



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU V
SOUČASNOSTI**

PRESENT STATE OF INVESTMENT CASTING TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Barbora Ostrézi

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Studentka:	Barbora Ostrézi
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
Akademický rok:	2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Technologie vytavitelného modelu v současnosti

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Přehled nejnovějších trendů v technologii vytavitelného modelu z hlediska používaných surovin a zařízení. Uvedení možností aplikací této progresivní technologie při výrobě náročných odlitků.

Cíle bakalářské práce:

Provedení literární rešerše zaměřené na nejmodernější zařízení a suroviny používané v technologii vytavitelného modelu se zaměřením na výrobu voskového modelu, keramické skořepiny, vytavování vosku a tepelného zpracování keramické formy před odlitím.

Seznam doporučené literatury:

BEELEY, Peter a Robert SMART. Investment Casting. 1 ed. London: The Institute of Materials, 1995, 486 s. ISBN 09-017-1666-9.

HORÁČEK, Milan. Technologie vytavitelného modelu - technologie pro nové tisíciletí. Slévárenství. Brno: Svaz sléváren ČR, 2001, (10). ISSN 0037-6825.

HORÁČEK, Milan. Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu. In: Technologie vytavitelného modelu [online]. Brno: FSI VUT Brno, 2009 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/download/technologie-vytavitelneho-modelu.pdf>

TALANDA, Ivan. Optimalizace technologie výroby odlitků ze slitin Al metodou vytavitelného modelu. Brno, 2012. Diplomová práce. FSI VUT Brno. Vedoucí práce Prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

Investment Casting Wax. Westechwax: Casting Waxes [online]. 2014 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.westechwax.com/investment-casting-wax>

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na výrobu vytavitelného modelu a sledování nejnovějších trendů v této oblasti. Popisuje se zde postup výroby od matečné formy, typů používaných vosků, výroba voskového modelu a keramické skořepiny, vytavování a žíhání, výroba a použití keramických jader, odstranění skořepiny a dokončovací operace.

Klíčová slova

Matečná forma, voskový model, vosk, přesné lití, skořepina

ABSTRACT

This bachelor thesis is focusing on production of lost wax pattern and monitoring of the latest trends in this area. Thesis describes procedures of production from mother die, types of used waxes, production of ceramic shell, de-waxing and shell firing, production and using ceramic cores, removal of ceramic shell and finishing operations. The goal of this thesis is to formulate literature search dedicated to overview of presently used technologies and also the latest raw materials used in this technology.

Key words

Mother die, wax pattern, wax, investment casting, ceramic shell, de-waxing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

OSTRÉŽÍ, Barbora. *Technologie vytavitelného modelu v současnosti*. Brno, 2017. 41s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Odbor slévárenství. Vedoucí práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Technologie vytavitelného modelu v současnosti** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Barbora Ostrézí

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto prof. Ing. Milanu Horáčkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

Abstrakt

Prohlášení

Poděkování

Obsah

1	TECHNOLOGIE PŘESNÉHO LITÍ	9
1.1	Historie	9
1.2	Přehled světové výroby	10
1.3	Princip technologie vytavitelného modelu.....	11
2	VÝROBA VOSKOVÉHO MODELU	12
2.1	Formy a jejich materiály na výrobu modelů.....	12
2.2	Způsoby výroby voskových modelů.....	15
2.3	Voskové směsi	16
2.3.1	Rozdělení voskových směsí	16
2.3.2	Základní složky voskových směsí	18
2.3.3	Trendy voskových směsí	20
2.3.4	Jádra.....	21
2.3.5	Zkoušky a kontrola voskových směsí.....	22
2.4	Sestavování voskových modelů	26
2.5	Regenerace a rekonstituce vosků.....	28
3	VÝROBA KERAMICKÝCH FOREM – SKOŘEPIN	30
3.1	Materiál skořepiny.....	30
3.2	Obalování – výroba skořepiny	32
4	ODLÉVÁNÍ A DOKONČUJÍCÍ OPERACE	36
4.1	Odlévání.....	36
4.2	Dokončující operace	37
5	UPLATNĚNÍ TECHNOLOGIE A TRENDY VE VÝROBĚ.....	39
5.1	Využití v průmyslu	39
5.2	Výroba prototypů pomocí 3D technologie.....	39
	ZÁVĚR.....	41
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	42
	SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	46
	SEZNAM GRAFŮ	47

ÚVOD

Technologie vytavitelného modelu je jedním z prvních procesů používaných k výrobě kovových odlitků, patří tedy mezi nejstarší slévárenské technologie a díky pokrokům, které se během 50ti let rozšířily nejvíce, je tak možno dělat velmi přesné tzv. „téměř na hotovo“ („near-net-shape“) odlitky s vysokou jakostí povrchu. Technologie je vhodná pro tvarovou a rozměrovou přesnost, či materiálovou náročnost. Nejdůležitějším cílem je vyrobit odlitek, který nemá požadavek na dokončující operace, nebo ho má co nejmenší, což je velmi výhodné jak z efektivního, tak z ekonomického hlediska, na něž jsou v dnešní době kladeny vysoké požadavky.

Cílem bakalářské práce je popsat celý proces této technologie a její nejnovější trendy. Je zaměřena na používané voskové směsi při výrobě voskového modelu, výrobu voskového modelu, suroviny na výrobu keramické skořepiny, výrobu skořepiny, na vytavování vosku a tepelné zpracování keramické formy a úplné odstranění zbytku voskového modelu před litím.



Obr. 1 Odlitky vyrobené technologií vytavitelného modelu [30]

1 TECHNOLOGIE PŘESNÉHO LITÍ

1.1 Historie [1], [3], [4], [5]

Technologie vytavitelného modelu „na ztracený model“ patří mezi nejstarší technologie ve slévárenství. První zmínky byly objeveny u národů a kultur, jež už zanikly např. Egypt, Palestina, Thajsko a Eufkrat, a které existovaly již před 6000 lety. Nejčastěji byly vyráběny ozdobné a umělecké předměty. Originální model byl vyroben z včelího vosku a ručně na něj pak byla následně nanesena vhodná hlína, což umožnilo vyrobit formu. Pro vytvoření dutých odlitků byla používána hliněná jádra. O existenci této technologie bylo nalezeno nejvíce důkazů v raném novověku, především v renesanční Itálii. Nejznámějším představitelem této doby byl Benvenuto Cellini, který tvořil především kovové sochy a šperky.



Obr. 2 Bronzová socha Persea s hlavou Medúzy (Cellini – 1540) [31]

Po renesanční Itálii nastala dlouhá pauza a technologie se zpátky objevila až v 19. století, kde se začala používat především v zubní technice a v bižuterii. Největší rozmach a nástup průmyslového využití přinesla až druhá světová válka. Zde se ukázalo, že používání pískových forem nepřináší kvalitní a tvarově složité odlitky s potřebnou povrchovou jakostí. Až rozvoj vědy přinesl nové modelovací a formovací hmoty a mechanizaci jednotlivých výrobních etap. Přesné lití také prošlo řadou technologických změn a to zavedení rozměrově stálých modelových hmot, technologii samonosné skořepiny o vysoké pevnosti a rozměrově stálosti za vyšších teplot, dále bylo zavedeno vakuové tavení a lití a pro vytvoření tvarově velmi složitých a přesných dutin vložena keramická jádra. Díky těmto zdokonalením je možno vyrábět odlitky s větší přesností a složitostí.

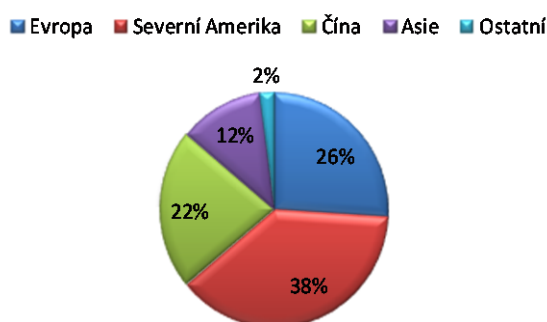
V dnešní době se technologie přesného lití používá v mnoha odvětvích. Především se jedná o strojírenský průmysl (technologie je využita především v energetice), leteckém průmyslu, zbrojním průmyslu, v lékařství (na kloubní náhrady a ve stomatologii), v elektrotechnice, na umělecké výrobky a jiné oblasti.

1.2 Přehled světové výroby [20],[3], [5]

Světová výroba přesných odlitků

Současná světová výroba odlitků technologií vytavitelného modelu se neustále rozšiřuje a je složité ji přesně určit, jelikož údaje o výrobě v Rusku a Číně nejsou příliš spolehlivé. Výrobu touto metodou lze z geografického hlediska rozdělit do několika teritorií a to procentuálně podle vyráběného objemu odlitků. Největším výrobcem je Severní Amerika, kam řadíme USA a Kanadu s 38% světové výroby, dále je to Evropa s výrobou 26%, Čína 22%, Asie 12% a zbytek světa vlastní 2% výroby.

Světový prodej odlitků dle objemu



Graf 1 Objemy prodeje odlitků ve světě [20]

Odběratelé odlitků přesného lití

Trendy na trhu s přesnými odlitky jsou různé, především jde o letecký průmysl, energetický, kosmický a automobilový, které patří k nejvýznamnějším a největším odběratelům. Odlitky se nejčastěji vyrábí ze slitin hliníku a hořčíku, pro jejich lehkost, jež má významný vliv především v letectví. Také lékařství (využití na kloubní náhrady, korunky zubů) a zbrojní průmysl se v dnešní době řadí k důležitým oborům. Velké uplatnění nachází i odlitky z neželezných slitin pro svoji dobrou rozměrovou toleranci, jakost povrchu a možnost vyrábět tenkostěnné odlitky. Nesmíme také zapomenout na umělecké předměty a bižuterii, v níž se nejčastěji vyrábějí prsteny.

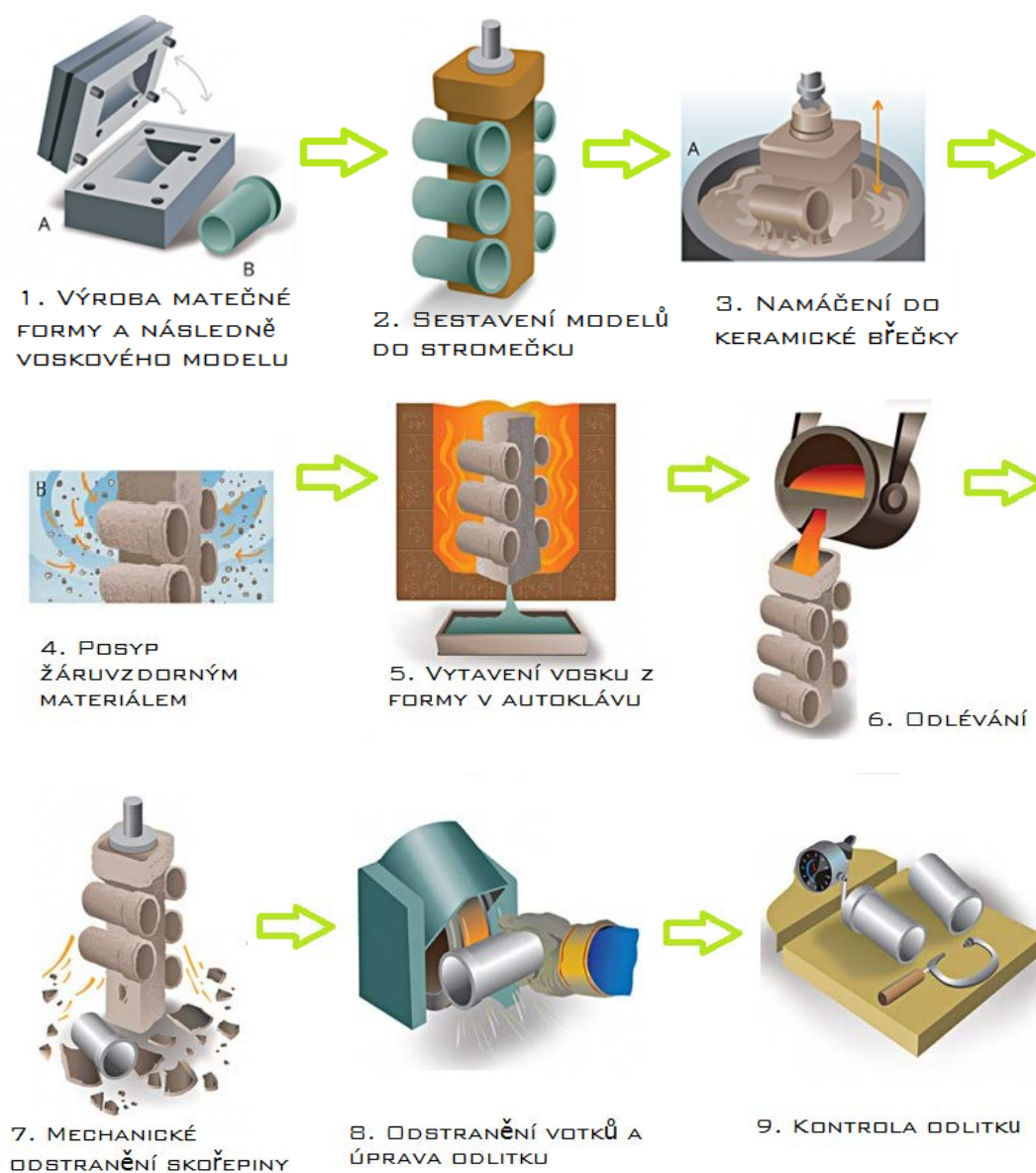


Obr. 3 Ukázka odlitků vyrobených metodou vytavitelného modelu [47],[34]

1.3 Princip technologie vytavitelného modelu [1], [2], [3], [4], [28]

Princip této technologie spočívá v tom, že se nejprve do předem vyrobené matečné formy pomocí vstřikování vyrobí voskový model (dnes je možno použít i model z plastu, který je tisknut na 3D tiskárně). Hotové voskové modely se dále připojí k vtokovému systému a vytvoří tzv. stromeček, jenž se namáčením do keramické břechky a následným posypáním keramické hmoty s žáruvzdorným materiálem obalí a vytvoří keramickou skořepinu. Vosk je ze skořepiny vytaven a ta je následně tepelně zpracována žiháním, aby dosáhla své pevnosti. Do takto připravené formy můžeme začít odlévat. Po vychladnutí kovu následuje mechanické odstranění skořepiny, odřezání odlitků od vtokové soustavy, oddělení vtoků od odlitku broušením a další dokončovací operace jako je tryskání, broušení a leštění.

Postup výroby odlitků je zobrazen na obrázku (obr. 4) a jednotlivé fáze výroby jsou popsány v následujících kapitolách.



Obr. 4 Jednotlivé kroky při výrobě odlitku [32]

2 VÝROBA VOSKOVÉHO MODELU [1], [2], [5], [6],[7], [13]

Zde nastává jedna z prvních nejdůležitějších fází výroby. Tou důležitou fází je výroba matečné formy. Pro to abychom vyrobili kvalitní a přesný odlitek, musíme mít přesný model s dokonalým povrchem a s přesně dodržnými rozměry. Pro takový model je důležité mít velmi přesně vyrobenou formu, přičemž tvar dutiny je shodný s budoucím tvarem součásti. Z tohoto důvodu jsou kladeny velké nároky na její zhotovení, a proto je nejdražší fází výroby. Dále je důležité mít kvalitní voskovou směs, která dokonale vyplní matečnou formu a vytvoří tak vysoce kvalitní voskový model, jak z hlediska povrchové jakosti, tak rozměru. Konečný rozměr voskového modelu je ovlivněn vstřikováním, neboli jeho navolenými parametry.



Obr. 5 Voskové modely [29]

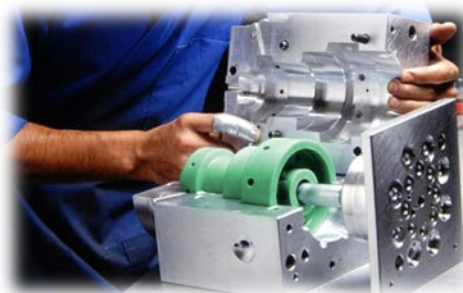
2.1 Formy a jejich materiály na výrobu modelů

Jelikož mají formy důležitou funkci, je nutné, aby po vstřiknutí voskové směsi vytvořily voskový model s dokonalým povrchem a požadovanou rozměrovou přesností, bez bublin, staženin či jiných povrchových vad. Dále zajistit co nejkratší dobu setrvání vosku ve formě po vstřiknutí. Kritickým faktorem mezi výrobcem a zákazníkem je právě modelové zařízení, které má významný vliv na cenu a kvalitu odlitku. Dle požadavků zákazníka, jako je celkový počet kusů v sérii, počet kusů v dávce, koncové využití odlitků, požadavky na kvalitu odlitků, se navrhuje (volí) modelové zařízení.

Formy dělíme podle jejich konstrukce, účelu a použití (výroba modelů, vtoků, nálitků), stupně mechanizace a automatizace pracoviště, způsobu výroby (obrábění či odlévání), podle materiálu formy.

A) Formy vyráběné obráběním

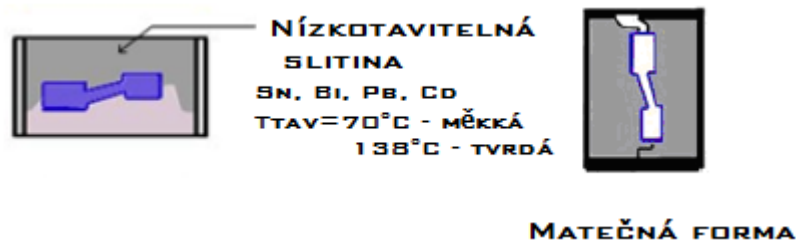
U tohoto způsobu výroby není potřeba použít matečný model, jelikož je model tvořen přímo do bloku kovu. Formy vyráběné především z oceli a slitin hliníku jsou používány tam, kde je požadavek na dlouhou životnost, tedy pro velkosériovou výrobu a pro odlitky, které vyžadují tu nejvyšší přesnost. Díky těmto požadavkům se kladen velký důraz na to, aby byla forma vyrobená s co největší přesností, to je činí drahé, jelikož je jejich výroba nejvíce nákladná. Za předpokladu, že se v odlitku nachází dutina, jež je mimo dělicí rovinu, je nutností použít výsuvná jádra. Jejich umístění ve formě je ale velmi složité a pracné. Hliník je oproti oceli výhodnější v tom, že se jednodušeji a rychleji obrábí, má lepší tepelnou vodivost a výrazně nižší hmotnost. Naopak ocel je oproti hliníku výhodnější v tom, že formy jsou méně náchylné na deformace a poškození a při opravě formy je ocel lépe svařitelná.



Obr. 6 Forma zhotovená obráběním [29]

B) Výroba formy podle matečného modelu

- **Formy ze zinkových slitin** - matečný model je zalit zinkovou slitinou. Formy z této slitiny jsou tvrdší, lépe odolávají opotřebení a poškození, mají vyšší životnost a jsou převážně používány na větší série. Nevýhodou u je, že nejsou příliš vhodné na výrobu modelů s velkými dutinami nebo bočními a šikmými jádry.
- **Formy z nízkotavitelných slitin** - jejich výroba je jednoduchá stejně jako u forem ze zinkových slitin. Kovový matečný model, který je z jedné strany usazen do ocelového pláště je zalit nízkotavitelnou slitinou. Modely mají vysokou kvalitu povrchu a požadovanou rozměrovou přesnost. Díky nepříliš dlouhé životnosti se používají k výrobě menších počtů modelů.



Obr. 7 Forma z nízkotavitelné slitiny [5]

- **Formy z plastických hmot** - výroba je opět jednoduchá. Matečný model se zalije epoxidovou pryskyřicí nebo dentakrylem. Tyto formy jsou levné, ovšem trvanlivost je nízká, a proto se používají pro malosériovou výrobu. Nevýhoda spočívá v tom, že nejsou tak přesné jako formy předchozí.
- **Formy ze sádry** - forma je vyrobena zalitím matečného modelu sádrou. Používají se především k výrobě jednotlivých modelů, na které nejsou kladeny tak velké nároky na rozměrovou přesnost. Formy mají minimální životnost a spíše slouží k ověřování navrhované technologie a plnění probíhá volným gravitačním litím.



Obr. 8 Sádrová forma [5]

- **Formy ze silikonového kaučuku** - silikonovým kaučukem je zalit matečný model. Formy se používají především na ověření navržené technologie odlitku a pro umělecké předměty a bižuterii. Především se používají u malého množství kusů, které nemusí mít rozměrovou přesnost. Mezi hlavní výhody řadíme krátkou dobu výroby, možnost vyrobit formu s negativním úkosem, komplikované dělicí roviny a lehká dosažitelnost úprav, změn a modifikace. Naopak mezi nevýhody řadíme malou tepelnou vodivost (prodlužování výrobního cyklu) a malou životnost forem oproti formám vyrobených ze slitin hliníku a oceli.



Obr. 9 Forma ze silikonového kaučuku a model [33]

- **Formy vyráběné galvanoplasticky** - výroba této formy je založena na principu elektrolýzy. Matečný model se ponoří do galvanické lázně, kde na něm postupně vytvoří tenká vrstva kovu - skořepina (tzv. kovová skořepina) z niklu, mědi nebo železa. Vrstva je tlustá asi 0,4 – 4 mm a po usušení se zalije epoxidovou pryskyřicí nebo slitinou hliníku. Vyrobené formy jsou přesné a lze vyrábět i velmi komplikované výrobky, které jinou metodou nevyrábíme.



Obr. 10 Forma vyrobená pomocí galvanoplastiky [5]

- **Formy vyráběné metalizací** - jedná se o metodu výroby forem, při níž se na matečný model pomocí metalizační pistole vrhají roztavené částice kovu. Kov je přitom roztaven plamenem či obloukem a částice jsou na materiál unášeny nosným plynem, přičemž se nárazem na model spojují do sebe a vytváří pevnou souvislou vrstvu kovu, která kopíruje všechny tvary. Tato vrstva je tenká asi 3 mm. Na vzniklou kovovou skořepinu se nalije epoxidová pryskyřice plněná kovovým práškem nebo nízkotavitelnou slitinou. To činí vysokou životnost formy, počet vstřiků dosahuje od 10 000 do 100 000, podle složitosti formy. Tyto formy jsou vhodné zejména pro modely, u nichž je komplikovaná dělící rovina. Jejich výroba je rychlá a nevýhodou je složitá úprava formy.



Obr. 11 Výroba forem metalizací [5]

a) Vstřikovací stoj pracující s tekutým voskem

Tekutý vosk je do formy vstřikován pod nízkým tlakem cca 0,5-1 MPa.

b) Vstřikovací stoj pracující s kašovitým voskem

Vosk v kašovitém stavu je vstřikován pod tlakem od 2,5 do 5MPa. Tyto modely sice mají horší povrch, ale o to lepší rozměrovou přesnost.

c) Vstřikovací stoj pracující s tuhým voskem

Tuhým voskem jsou zde myšleny předpřipravené voskové modely, které jsou ohřáté na požadovanou teplotu. Polotovár je pod tlakem lisován do formy.

2.3 Voskové směsi [6],[8],[5],[12],[7],[16],[17],[29]

Vosk není jednoduše jen "vosk" - to je celá řada produktů, jež jsou chemicky kombinovány s cílem poskytovat vlastnosti, které jsou potřeba pro získání kvalitního voskového modelu, a proto je důležité mít kvalitní voskovou směs. Jedná se o sloučeniny z více komponentů, jako je uhlovodíkový vosk, syntetický vosk, přírodní esterový vosk, přírodní a syntetická pryskyřice, organické plnivo a voda. Každá ze složek upravuje vlastnost vosku a také záleží jakou velikost má jejich strukturní řetězec. Ten zvyšuje bod tání, tuhnutí a tvrdost pokud je řetězec dlouhý. Dále ovlivňuje viskozitu a rozpustnost.

Díky kombinací různých sloučenin, můžeme vytvářet voskové směsi, které splňují požadavky a vlastnosti na ně kladené.

2.3.1 Rozdělení voskových směsí

Jelikož se stromeček skládá z více částí – nálevka, vtoková soustava, vtoky a model, je potřeba na každou část použít jiný druh vosku. Podle tohoto užití se také vosky dělí. Vosky na vtokovou soustavu a vtoky není potřeba mít kvalitní z hlediska rozměrové a povrchové přesnosti, ale je potřeba, aby měly požadovanou pevnost. Důležité je mít kvalitní vosk na model, protože ten je pro nás klíčový. Používají se čisté (neplněné), plněné a emulgované vosky. Dále rekultivované a speciální vosky, které slouží na vosková jádra, rozpustné, opravné, lepidlo a namáčecí vosky. Vosky se používají barvené z jednoho prostého důvodu, a to že při vytavování vosku, vosk sám detekuje chyby – praskliny ve skořepině, a tak je možné ještě před odlitím tento defekt opravit. Není tedy podmínkou, že barva určuje vlastnosti vosku, každá firma používá jinou barvu vosků.

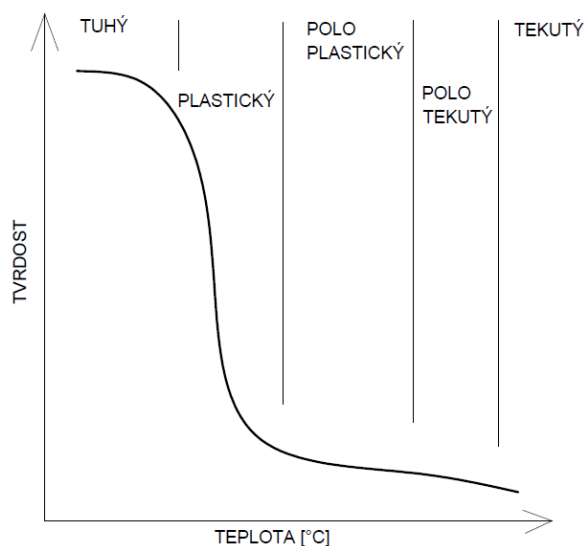


Obr. 13 Voskové čočky [29]

Požadované vlastnosti voskových směsí

- Směs by měla mít při ohřevu minimální roztažnost a při chladnutí minimální smrštění.
- Při tuhnutí ve formě by měla získat dostatečnou pevnost a tvrdost, ale zároveň by neměla být křehká.
- Směs musí přesně napodobovat stěny formy, nesmí se na ně lepit a její povrch by měl být hladký a čistý.
- Měl by být zaručeně nízký obsah popelovin, jinak dojde k vadám.

- Hmota by měla být recyklovatelná a zdravotně nezávadná.
- Měla by odolávat oxidaci a neměla by chemicky reagovat s keramickou březkou.
- Vyrobený model by měl mít voskovou smáčitelnost vůči keramické březce.
- Zajistit dobu tuhnutí ve formě co nejkratší.



1) Vosky na modely

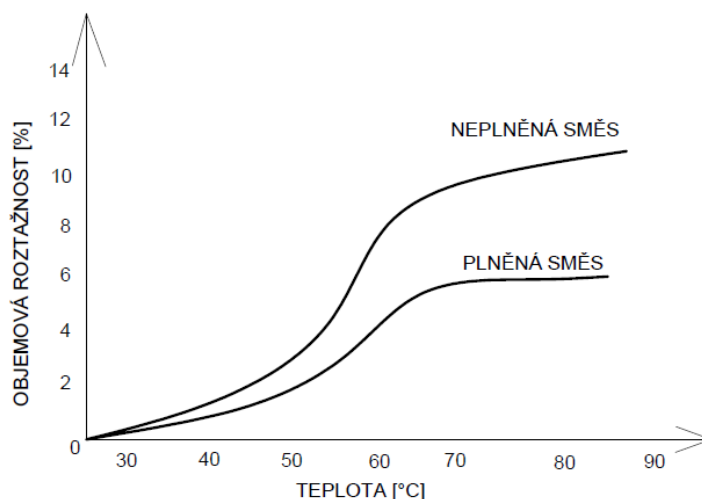
Jedná se o vosky, které se především používají na výrobu modelů, a díky jejich vlastnostem je lze vstříkovat na všech typech vstřikolísů. Následně jsou regenerovány či rekonstituovány.

- **Neplněné vosky** – jsou složeny z pryskyřičných komponentů a komplexních sloučenin, a spolu vytváří lesklý a kvalitní povrch voskového modelu. Dají se vstříkovat při různých teplotách (až při 120°C) a snadno recyklovat. Mají nízký obsah popela.
- **Plněné vosky** – do základního materiálu (podobného jako u neplněných vosků) se navíc přidává práškové plnivo (20 – 40%), které se ve vosku nerozpouští a zvyšuje jeho stabilitu a snižuje kavitaci (tvoření bublin). Povrch je hrubší a vstřikovací teplota je okolo 120°C. Vosk patří mezi nejpoužívanější a díky mechanickým vlastnostem je označován za tvrdé vosky.
- **Emulgované vosky** – základní materiál je emulgován vodou nebo vzduchem (obsah 7 – 12% plniva), a tvoří mimořádně hladký až sklovitý povrch. Díky těmto plnivům je malý výskyt propadlin a zajištěna rozměrová stabilita. Plní se při maximální teplotě 95°C a opět mají nízký obsah popela.

2) Vosky na vtoky

Tyto vosky je potřeba mít o vysoké pevnosti, jelikož musí unést váhu modelů, proto se používají vosky o stejném chemickém složení jako neplněné vosky.

- **Rekultivované vosky** – jedná se o vosky používané na vtokové soustavy, protože tyto vosky už byly jednou použity. Očištěním, mícháním byly uvedeny zpět do původního stavu.
- **Speciální vosky** – řadí se zde více druhů vosků, jako jsou:
 - Adhesní – slouží k lepení jak podobných vosků, tak rozdílných a především se lepí hotové voskové modely na vtokové soustavy,
 - Namáčecí – mají skvělou zabíhavost do těžko dostupných míst,
 - Opravné – používají se pro utěsnění vtoku a opravu modelů, buď v tvrdém či měkkém stavu,
 - Vosky na jádra – slouží k utěsnění vkládaných keramických jader do modelů a snižují praskání,
 - Vodou rozpustné – tyto vosky jsou ze speciálních látek, jež rozpouští voda nebo slabá kyselina. Z nich se vytvoří model sloužící jako jádro, na který je vytvořen další model ze základního vosku, kdy se následným ponořením do vody rozpustí a tvoří pro tento model dutinu. Směs má dobrou rozměrovou stabilitu s malým sklonem k tvorbě propadlin.



Graf 3 Vliv plniv ve voskových směsích na roztažnost [6]

2.3.2 Základní složky voskových směsí [6],[10]

a) Parafín

Řadí se na výrobu měkkých vosků a je specifický svou křehkostí a malou pevností. Měkne při teplotě asi 30°C a natavován je při teplotách do 64°C. Může obsahovat až 0,1% popela. Model je vyroben gravitačně či na plničkách. Jeho struktura je tvořena krátkými rovnými řetězci molekul.

b) Mikrokrystalický vosk

Tento vosk má vyšší pevnost a ohebnost, kterou mají za následek mikrokrystaly a tvoří jemnou strukturu. Řetězce jsou zde delší a rozvětvené což udává, že se vosk taví až v teplotách od 60° do 93°C.

c) Tvrdé vosky

Jelikož se jedná o tvrdé vosky, je zřejmé, že jejich viskozita bude nízká. Jde o modifikované uhlovodíkové nebo přírodní směsi s bodem tuhnutí v mezích 65 – 120°C.

d) Pryskyřice

Pryskyřice je tvořena složitými řetězci a její hlavní cíl je ztekutit voskovou směs. Neměla by být reaktivní, aby nedocházelo k oxidaci – tím by totiž došlo k jejímu znehodnocení. Je rozdělena do tří druhů:

- Přírodní – měknou v teplotách od 80 – 180°C a jedná se o složité organické sloučeniny např. modifikované, polyesterové nebo hydrogenesterové pryskyřice
- Syntetické – měknou při teplotě od 25 do 190°C, z organických sloučenin polymerové či esterové pryskyřice
- Uhlovodíkové – měknou při teplotě 18 – 176°C a jsou to petrochemické produkty (monomerová, aromatická nebo hydrogenovaná pryskyřice)



Obr. 14 Pryskyřice pro přesné lití využita pro klenoty [34]

e) Přírodní uhlovodíkový vosk

Jedná se o jednoduchý uhlovodík složený z přímých řetězců. Taví se při teplotě od 32 do 66°C.

f) Polymery

Ovlivňují fyzikální vlastnosti a to především houževnatost a zvyšují viskozitu. Mezi nejpoužívanější patří etylén vinyl acetát (EVA), který patří k nereaktivním složkám voskových směsí. Bod tavení mají od 50 do 200°C.

g) Plniva

Mají hned několik funkcí najednou. Tou hlavní je snižování smrštění směsi, která hraje klíčovou roli při vytavování, aby nepopraskala skořepina, a zamezí tvorbě staženin při tuhnutí. Dále zvyšuje mechanické vlastnosti, zvýšení rozměrové stability, zvýšení viskozity a zlepšení chování při vstřikování. Použití plniv je rozděleno dle požadavků konkrétního procesu a způsobu regenerace, kde patří:

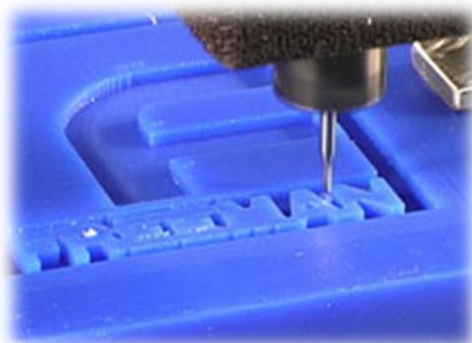
- **Bisfenol A (BPA)** – je to organická sloučenina, díky níž lze vosky vstřikovat při nižších teplotách. Nad teplotou 100°C se ve vosku usazuje.
- **Zesítný polystyren (XLPS)** – jde o tepelně stabilní organické plnivo, které zajistí rozměrovou stálost směsi. Je jednoduše regenerováno, ale bohužel je drahé.
- **Voda jako plnivo** – voda snižuje výskyt bublin a zvyšuje kvalitu povrchu modelu. Směsi jsou snadno regenerovány, ovšem musíme kontrolovat správnou teplotu směsi, jinak by došlo k odpaření vody a to by vedlo k nekvalitním a neshodným modelům.
- **Kyselá plniva** – kys. tereftalová a isoftalová jsou známé svou vysokou hustotou a zaručují modelu dobrý povrch. Mají tendenci se usazovat a tak je potřeba neustále míchat.

2.3.3 Trendy voskových směsí [23],[22],[21]

V dnešní době se sortiment s vosky rozšířil především díky pokrokům v chemii a vzniku nových technologií. Ve výrobě nových a vhodných směsí se firmy takřka předbíhají. Trendy jsou:

❖ Tvrdé vosky - MACHINABLE wax

Nebo také opracovatelný vosk („MACH wax“) - jedná se o vosk, který je extrémně tvrdý a řadí se mezi obrobitelné vosky. Lze ho obrábět na klasických konvenčních strojích nebo na CNC centrech, díky čemuž získá vysokou povrchovou kvalitu a rozměrovou přesnost. Jako ostatní vosky se mohou opakovaně roztavovat a používat, jedinou nevýhodou je jejich vyšší teplota tání a vyšší hmotnost než u většiny jiných vosků. Rovněž jsou výhodné v tom, že při jejich vytavování nepraskají skořepiny jako u ostatních vosků. Modely z tohoto vosku jsou k sobě spojovány speciálním termoplastickým materiálem („MACH FIX“), jenž se používá i na spojení jiných materiálů. Opracovaný vosk je ideální pro ověření CNC obráběcí programy. Materiál je samomazný a tudíž nepoškozuje nástroj, je šetrný k životnímu prostředí. Je možné vosk uplatnit také jinde než u vytavitelného modelu, dále třeba prototyping (3D tisk), dentální CAD/CAM, šperkařství.



Obr. 15 Tvrdý vosk [23]

❖ Plátový vosk - SHEET wax

Neboli listy vosku jsou speciálně vytvořené ultra lehké a přesné pláty vosku za pomoci válcování. Za pokojové teploty jsou ohebné a libovolně tvarovatelné, dají se snadno řezat nožem či stříhat nůžkami. Na listy je také možno kreslit potřebný vzor – jednotlivé kusy, které se následně skládají do předem připravené formy a kopírují tak dokonale její tvar. Jsou vhodné pro výrobu „high-tech“ dílů, nejčastěji se jedná o letectví, námořní (lodě, kajaky) a automobilový průmysl. Velice často se také tyto vosky využívají ve stomatologii, kde slouží k vytvoření obtisku zubů.



Obr. 16 Plátový vosk [22]

❖ PARA – TECH – MEDICAL wax

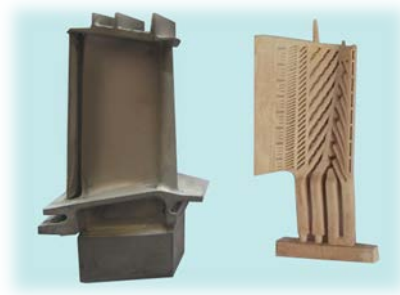
Jedná se o speciální vosk, který je používán v lékařství při výzkumu. Používá se pro analýzu histologie u patologického hodnocení tkáně. V podstatě jde o „zalévání“ tkáňových vzorků vysoce čistým parafínem, obsahujícím polymer. Tento vosk výrazně minimalizuje kompresi tkáně a poskytuje pružnost, jež produkuje vynikající povrch bez vrásek.

2.3.4 Jádra [15],[24],[2]

Jádra nám slouží k vytvoření vnitřních složitých dutin, jako jsou například otvory odlitků a drážky (používaných v energetice obr. 17 a 18). Jádro je omezeno především délkou otvorů, šířkou a hloubkou drážek, u nichž by mohlo docházet k neúplnému zatečení vosku. Používají se především proto, že by jinou metodou (obráběním) nebylo možné vytvořit tak složité dutiny. Nejrozšířenější oblastí použití těchto jader je v energetice, kde slouží k vytvoření kanálků chlazení lopatek a v letectví rovněž.



Obr. 17 Keramické jádro vytvořené 3D tiskem [35]



Obr. 18 Keramické jádro pro lopatku [37]



Obr. 19 Pískové jádro pro konformní chlazení vytvořené 3D tiskem [36]

A) Voskové jádra

Podobně jako voskové modely se i vosková jádra vyrábějí vstřikováním do matečné formy a to nejčastěji kovové, z důvodu její vysoké přesnosti. Stejně tak lze vytvářet tvary komplikované, ne však příliš, kvůli následnému odstranění skořepiny z dutiny. Jediný rozdíl je v tom, že vosk použitý na jádra je jiného složení než vosk použitý na modely. Jedná se o vosk rozpustný ve vodě nebo ve slabé kyselině a bývá většinou barevně rozlišen od druhého, aby bylo poznat, že při odstranění byl všechen potřebný vosk odstraněn. Rozpustný vosk nám v podstatě vytvoří podporu, na kterou je v následujícím kroku vstříknut modelový vosk a celá sestava se nechá odpočinout do dosažení potřebné pevnosti modelového vosku. Následně je sestava ponořena do kapaliny, kde dojde k odstranění rozpustného vosku. Vosk dále putuje na obalování. Touto metodou jsme schopni získat více vnitřních geometrií odlitku. Na obr. 21 je rozpustný vosk žluté barvy a modelový vosk barvy modré.



Obr. 20 Model z rozpustného a modelového vosku [24]

B) Keramická jádra

Forma na vytvoření keramického jádra je opět z oceli nebo hliníku, v některých případech se jádra vytváří přímo „na hotovo“ a to tak, že se potřebné jádro vytvoří do pískového bloku frézováním, nebo se dokonce využívá technologie 3D tisku „rapid prototyping“, pokud jde o velmi složité tvary. Do formy je hmota vpravována buď vstřikováním, nebo se keramická kaše (podobného složení jako obalová hmota) nechává zatéct do formy až do ztuhnutí, kdy se z formy vyjme. Plní stejnou funkci jako jádro voskové s tím rozdílem, že po vstříknutí modelového vosku na keramické jádro, se jádro dále neodstraňuje, ale zůstává s modelem po celou dobu zpracování až po odlití. Při vytavování vosku se vypálením jádra vytvrdí a vzniknou keramické vazby. Po vychladnutí kovu se jádro musí z odlitku odstranit vodou (vodou vyplavitelná jádra), mechanicky nebo chemicky (louhování alkalickými hydroxidy), což je velice nákladné. Na obr. 22 je keramické jádro ze světlé keramiky, voskový model je modrý a hotový výrobek je šedý (kovový).



Obr. 21 Keramické jádro bez a s modelovým voskem a hotový odlitek [24]

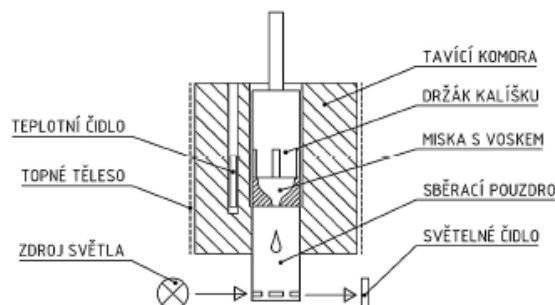
Jelikož nemůžeme způsob odstranění jader louhováním použít u všech materiálů, především u odlitků ze slitin hliníku, musí se jádra vyplavovat za pomoci vody. Pro optimální výsledek musí jádra splňovat hned několik parametrů, jde především o rozměrovou přesnost jádra ($\pm 0,2$ mm), přijatelné rozměrové smrštění (max. 2%), dostatečnou mechanickou pevnost zvláště v ohybu (min. 3 MPa), odolnost proti pronikání vlhkosti při obalování voskového modelu a během vytavování vosku, stabilitu při teplotních změnách, musí být rozpustné ve vodě a nesmí navázat vazbu s kovem – interakce, která vede k povrchovým vadám. Více se o vyplavitelných jádrech dočteme v odborném článku (15).

2.3.5 Zkoušky a kontrola voskových směsí [7],[6],[52],[19],[5]

Kontrola kvality a vlastností vosků je velice důležitá nejen pro výrobce ale i pro slévárnu. Je tedy nezbytně nutné dodržovat procedury kontroly. Vlastnosti vosku jsou nejvíce ovlivněny jeho výrobou, kvalitou surovin a zařízením. Výrobce si tak ověří, zda vosk vyhovuje daným specifikacím a zvaží, zda jej může prodávat. Testují se především fyzikální vlastnosti, jako jsou: bod tuhnutí, bod tavení, obsah popelovin, viskozita, zabíhavost, penetrace, množství vody, mechanická pevnost a nové testy DSC, oscilace, objemová roztažnost.

1) Bod tavení (skápnutí)

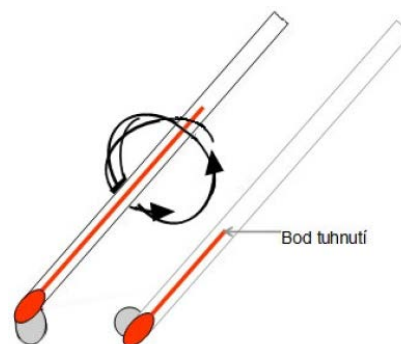
Zkouška je důležitá při vytavování procesu vosku ze skořepiny. Má zde veliký vliv druh voskové směsi, obsah plniva a jde v podstatě o teplotu, při které se vosk mění z pevného na kapalný. Ztuhlý voskový vzorek se postupně pomalu ohřívá ve speciální misce, až do doby, kdy otvorem v misce vyteče první kapka vosku. Kapku zachytí světelný paprsek a teplota, při které kapka ukápla, je zapisovačem zaznamenána jako teplota skápnutí.



Obr. 22 Měření bodu skápnutí [6]

2) Bod tuhnutí

Tato zkouška je důležitá ohledně vstřikovacích vlastností. Jedná se o teplotu, při níž přestane malá kulička vosku téci vlivem gravitační energie. Teplota nazývaná C.P. (bod tuhnutí) je tedy teplota, při které dojde ke změně skupenství z plastického na pevné. Nejvíce záleží na celkovém složení voskové směsi, na němž je tato teplota závislá. Teplotu u vstřikování tekutého vosku nastavujeme přibližně 4°C nad bodem tuhnutí a teplotu u vstřikování s kašovitým voskem nastavujeme zase 4°C pod bodem tuhnutí. Při zkoušení se vosk nesmí přehřát. Do roztaveného vosku se ponoří teploměr, který se po vytáhnutí umístí do předehřáté zkumavky, kde pomalu rotuje. Při rotaci kapka sklouzne na špičku teploměru a v okamžiku, kdy vosk ztuhne, se na stupnici teploměru odečte teplota, při níž přestal téct.



Obr. 23 Měření bodu tuhnutí [6]

3) Obsah popelovin

Popeloviny jsou nežádoucí nečistotou (jelikož jde o nespalitelné anorganické látky), které jsou obsaženy v panenských voscích, voskových směsích a dalších materiálech, jež se sem dostali z plniv. Vysoký obsah popelu ve vosku způsobuje na dokončených voskových modelech viditelné defekty, jako jsou vměstky. Ideální obsah popelu je pod 0,05%, lze ho snížit důkladnou filtrací a je zjišťován gravimetrickou analýzou.

4) Viskozita

V podstatě se jedná o to jak je vosk tekutý, tedy jak je hustý, či řídký podle toho, kolik množství a jaké plnivo obsahuje. Viskozita je zjišťována při teplotě vstřikování voskové směsi do formy tedy teplotě blízké bodu tuhnutí. Měří se tedy tekutost vosku při vstřikování i vytavování.

5) Zabíhavost

Jedná se o schopnost proudit a vyplnit celou dutinu formy. Pro tuto zkoušku se používá speciální forma, v níž je vytvořena spirála. Do formy se pod známým tlakem, teplotou a rychlostí vstříkne vosková směs a sleduje se, kam až vosk zatekl, podle značek vyrytých do formy. Čím má vosk vyšší viskozitu, tím méně teče.



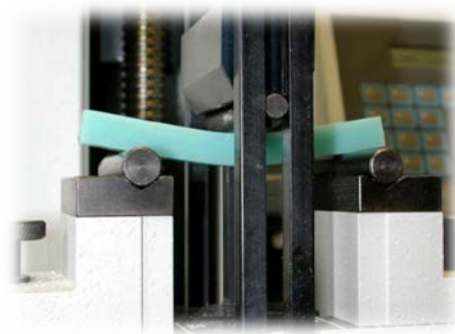
Obr. 24 Forma pro zkoušku zabíhavosti [6]

6) Penetrace

Penetrací se provádí zkouška tvrdosti vosku, kdy jehla definovaných rozměrů proniká do povrchu vosku kolmým směrem, při dané teplotě, jisté velikosti zatížení po určitou dobu zatížení. Přičemž vzorek s nižší penetrací je tvrdší než vzorek s vyšší penetrací. Tvrdost má především vliv na celkovou pružnost vosku.

7) Zkouška ohybem

Ověřuje se jí mechanická pevnost na tyči vyrobené ze zkoušeného vosku (odlit buď gravitačně, nebo pod tlakem a před zkouškou se ve vodní bázi ještě temperují). Měření probíhá do doby, kdy se objeví první trhliny či dostatečné prohnutí vzorku. Je důležitá z hlediska kontroly chování při manipulaci a skládání modelů do stromečku (u automatizovaných linek je nejvíce namáhána vtoková soustava). Mechanické vlastnosti musí být ideální pro zpracování, tedy ani tvrdé - křehké (poškození při sestavování) a ani měkké – ohebné (nedostatečná pevnost). Největší vliv na pevnost mají plniva – zvyšují rozměrovou stabilitu.



Obr. 25 Zkouška ohybem [52]

8) Obsah plniva

Plniva a jejich množství zásadně ovlivňují vlastnosti voskové směsi, jde především o zvýšení tvrdosti, tuhosti, viskozity a rozměrové stálosti, naopak snižují kvalitu povrchu a objemovou roztažnost. Vlastnosti bodu tuhnutí, skápnutí a obsah popela se při zvyšujícím množství nemění.

9) Množství vody ve vosku

Voda ve směsi zhoršuje pevnost, tvrdost a pružnost a do směsi se dostane z atmosféry, nebo při vytavování v boilerklávu. Test je prováděn tak, že se vzorek vosku zváží, následně se zahřeje, aby se odpařila část vody, a po ztuhnutí se znovu se zváží. Následně se na vlhkoměru zjistí rozdíl vlhkosti.

10) Smrštění

Je ovlivněno teplotou a tím, že pokles teploty nám udělá i pokles rozměrů. Čím více máme plniva, tím méně se nám vosk smršťuje. Smrštění modelu je ovlivněno parametry vstřikování, jeho rozměrem a tvarem.

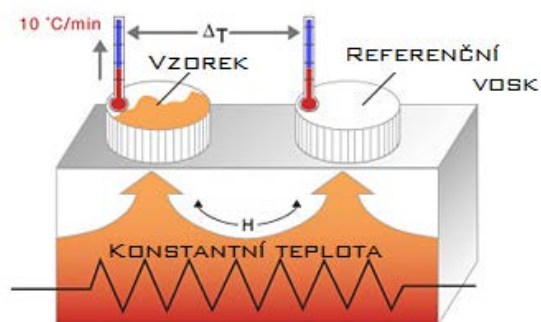
11) Objemová roztažnost

Je to přesný opak smrštění, kdy při zvyšující se teplotě narůstá rozměr směsi. Pokud má směs velkou roztažnost je riziko popraskání skořepiny při vytavování. Kritická tepelná roztažnost je mezi teplotou 20°C a bodem skápnutí.

Nové pokroky při testování vosků:**12) DSC**

Neboli diferenciální skenovací kalorimetrie – analytická metoda, jejímž úkolem je získat informace o tepelné charakteristice voskové směsi. Lze jí získat potenciální teplo potřebné na roztavení směsi a údaje o bodu tavení. Dále je možno zjistit při jakých teplotách se jednotlivé složky směsi taví. Je důležitá z hlediska získání informací o bodu měknutí, krystalizace, v oblasti cyklu s požadavkem na maximální energii a celkovou absorbovanou, či vydanou energii.

Na ohřívač jsou umístěny dva kelímky (hliníkové), každý obsahuje směs jiného složení (referenční vosk má známé parametry), a jsou přesným regulováním ohřívány. Každá směs pohlcuje energii jinak a tyto rozdíly jsou zaznamenány do programu, který nám vyhodnotí DSC křivku. V následujícím kroku, při řízeném ochlazování kelímků, jsou vyhodnoceny výsledky exotermického chování materiálů. Poskytne nám důležité informace o fázových přeměnách, jež mohou být užitečné k pochopení jednotlivých používaných surovin a výsledných voskových směsí.



Obr. 26 Princip zkoušky DSC [38]

13) FTIR

Fourierovo transformační infra-červené záření. Jedná se o test, kdy vstupující infra-červený paprsek je soustavou vysoce vyleštěných děličů paprsků rozdělen na dva směry. Jeden směr rozděleného paprsku směřuje do zkušebního vzorku a druhý směřuje přímo do přijímače. V přijímači se paprsky porovnají a software přijímače vyhodnotí frekvenci jejich vstupů a rozdílů, jež charakterizují materiál vzorku. Význam testu je pro zaznamenání tzv. „otisku prstu“ vosku, který je velmi rychle porovnáván se vzorky materiálů či surovin v databázi již zaznamenaných. Potvrzuje tak kvalitu, neboli čistotu, těchto vzorků. V podstatě jde o srovnávací metodu.

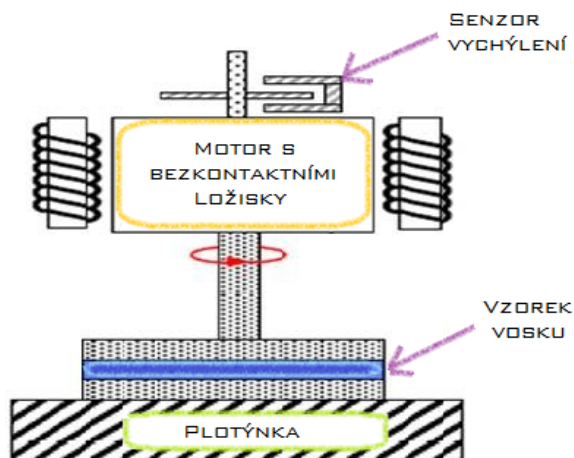


Obr. 27 Princip zkoušky FTIR [39]

14) Reometrie – oscilační zkouška

Tato metoda slouží k určení reologických vlastností zkoušeného vzorku. Zkoumané vlastnosti jsou jak kapaliny, suspenze či břečky, které reagují na působení silového zatížení. Na vzorek se nechá působit oscilační zatížení a je sledováno, jak molekuly v materiálu odporují těmto silám. Zkouška je podobná zkoušce měření viskozity s tím rozdílem, že struktura vzorku zůstává skoro nepoškozená.

Roztavený voskový vzorek se umístí do reometru mezi vřeteno, které aplikuje deformaci, a vyhřívanou plotýnku, která zajišťuje správnou teplotu vosku. Po nastavení vstupních parametrů začíná měření, kdy se postupně snižuje teplota a vzorek je deformován sinusovým průběhem. Senzor měří výchylku a rychlost deformace je dopočítána počítačem.



Obr. 28 Princip oscilační zkoušky [40]

2.4 Sestavování voskových modelů [1],[2], [4], [5]

Modely jsou vyráběny ve formách většinou jednotlivě, a proto se musí připojovat na vtokovou nebo nálitkovou soustavu. Rozlišujeme dvě sestavy umístění modelů na lici soustavě a to podle počtu modelů a jejich velikosti – sestavení jednotlivých kusů, sestavení do stromečku.

A) Sestavy jednotlivých modelů

Sestavení pro jednotlivé modely se používají, pokud máme odlitek, který je rozměrný a jsou zde kladeny vysoké požadavky na kvalitu odlitku a jeho rozměrovou přesnost. Vtoková soustava s různými druhy nálitků se vyrábí ve zvláštních formách a modely jsou připojeny pájením, nebo lepením.



Obr. 29 Sestava jednoho modelu [51]

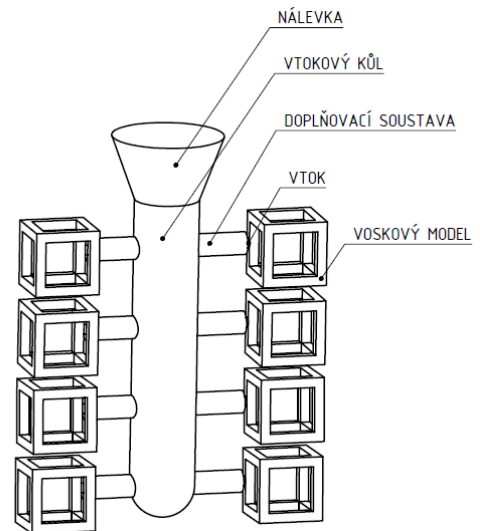
B) Sestavy více modelů do stroměčku

Sestavování modelu do stroměčku je určeno pro větší počet kusů modelů. Modely jsou připojeny jednotlivými vtoky na vtokovou soustavu. Připojeny jsou lepením, nebo pájením.

Pokud model připojujeme na vtokovou soustavu pájením, vložíme mezi ni a vtok modelu pájedlo, model se přitlačí na pájedlo, které nataví plochu, po vytažení pájedla je model připojen.

Jestliže připojíme model lepením, za pomoci pistole, musíme použít roztavené lepidlo, které je nanášeno na stykové plochy. Musíme dávat pozor na to, abychom při lepení modelů nepoškodili modely, které jsou na vtokové soustavě již připojeny, proto je důležité, aby byl tvar stroměčku vhodně navržen.

Pro sestavování stroměčků je důležité dbát na vhodné umístění modelů, aby při vytavování vosk ze skořepiny bez problému vytekl. Kdyby stroměček nešel vhodně sestavit a nedošlo by k úplnému odstranění vosku, je nutné použít pomocný výfuk, který umožní odstranění vosku z formy. Pokud ani ten nepomůže je potřeba na vtokové soustavě nebo modelu vytvořit výtokové otvory. Abychom při umísťování výtokového otvoru nepoškodili odlitek, musí mít model výstupku vhodný tvar. Po vytavení se výtokový otvor důkladně zatmelí.

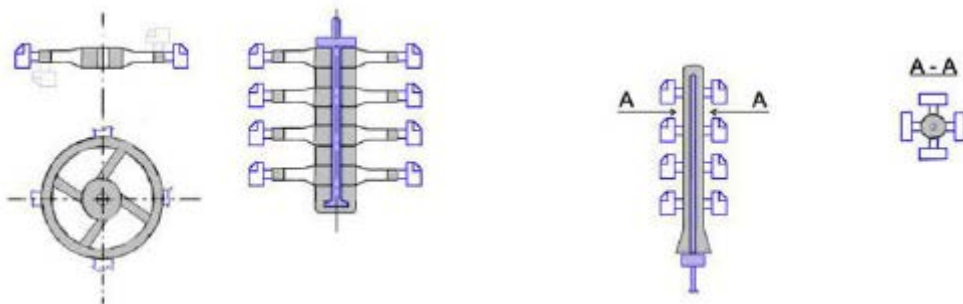


Obr. 30 Modelový stroměček

Modely na stroměčku se mají umísťovat, tak aby nedocházelo k nestejnomyšlnému usazování obalové hmoty v dutinách, což by mělo podstatný vliv na nerovnoměrné chladnutí. Je tedy vhodné umísťovat modely mezi sebou s dostatečnou vzdáleností tak, aby se vytvořená skořepina navzájem nedotýkala s jednotlivými modely. Stroměčky se dají ještě dále dělit podle sestavení modelů:

a) sestaveny horizontálně – etážově

b) sestaveny přímo na vtokový kanál

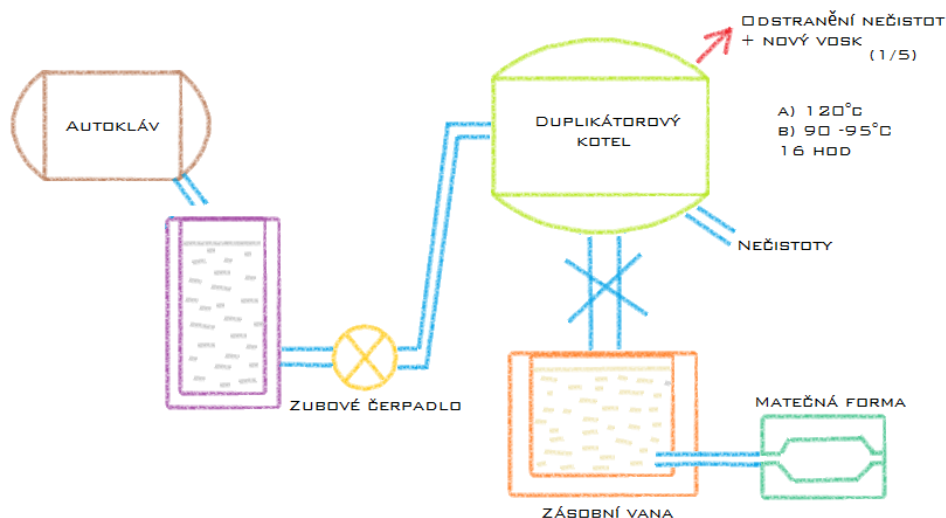


Obr. 31 Stroměčkové sestavy [7]

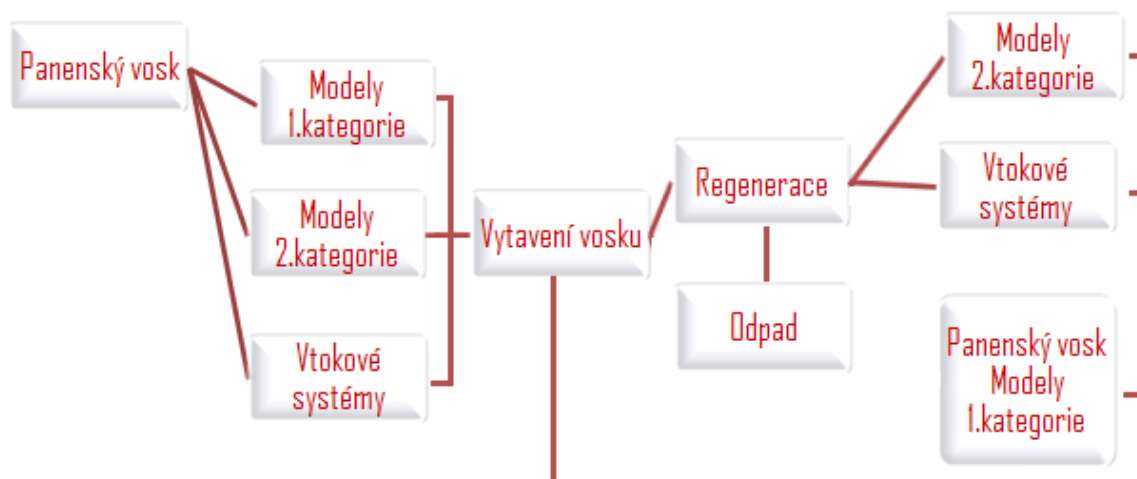
2.5 Regenerace a rekonstituce vosků [1],[2],[5],[7],[6]

Regenerace - patří mezi důležité výrobní i obchodní činnosti. Dříve se již použité vosky používaly pouze na výrobu nálitků a vtoků. Dnešní doba umožnila, že se tyto vosky mohou používat jako vosky panenské, jelikož mají skoro stejné vlastnosti i po regeneraci.

Při regeneraci se nejčastěji využívá těchto metod: filtrace, sedimentace, odstředivý způsob.

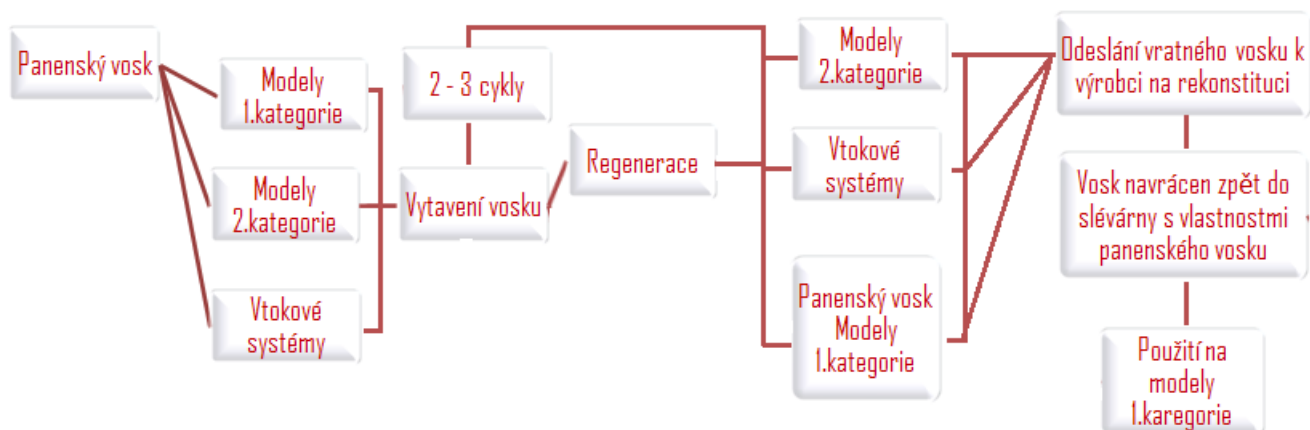


Obr. 32 Regenerace voskové směsi [5]



Obr. 33 Schéma regenerace voskové hmoty [5]

Rekonstituce – proces, kdy vytavený vosk (známého druhu) ze slévárny nebo jinak použitý, se vyčistí a zbaví nečistot a následně smíchá s novými surovinami a plnivý. Takto se vrátí do původního stavu a vosk je vhodné použít jak na modely, tak na vtokové soustavy.



Obr. 34 Schéma rekonstituce voskové hmoty [5]

3 VÝROBA KERAMICKÝCH FOREM – SKOŘEPIN [1],[2],[3],[5],[9],[11],[27]

Možnost vyrábět širokou škálu odlitků z velkého výběru slitin pomocí technologie vytavitelného modelu, dává právě keramická skořepina, která je rozhodujícím faktorem ve výrobě.

Forma je v podstatě nedělená, což ji dělá charakteristickým znakem technologie vytavitelného modelu. Po zhotovení formy se model vytavením zničí a je nutno použít pro každou formu nový model. To nám umožňuje vyrábět modely složitých tvarů, které by jinou metodou nešly vyrobit.

Nejvyšší koeficient tepelné roztažnosti mají voskové směsi, zatímco nejnižší má keramika. Slitiny mají hodnotu koeficientu uprostřed mezi keramikou a voskem, a proto vytváří nerovnováhu ve výrobě, kterou je potřeba kontrolovat.

Rozdílné teploty roztažnosti mezi voskem a keramikou způsobují nejčastěji to, že po výrobě skořepiny se zvýšením okolní teploty, voskový model uzavřený v keramické formě mírně roztáhne a způsobí její prasknutí. Je tedy důležité, aby se okolní teplota neustále sledovala, a zabránilo se tak těmto problémům.

Další problém, který musíme řešit je kontrakce – rozměrová změna. Vosk se smršťuje po vstřikování, keramika po vypalování a kov při ochlazování a chladnutí. Tyto vlastnosti činí výsledný rozměr odlitku odlišný od rozměru voskového modelu. To se projeví především u rozměrnějších odlitků, které budou mít větší zmenšení, a to dělá obtížné dodržení jejich tolerance.

3.1 Materiál skořepiny

Obecně se formovací hmoty skládají pouze ze dvou složek a to plniva a pojiva.

1) Plniva

Plniva jsou v podstatě materiály, které se používají jako obalová hmota, tedy žáruvzdorný materiál. Žáruvzdorný materiál více udává základní vlastnosti keramické skořepiny, než kapalně pojivo. Při výběru správného žáruvzdorného materiálu se řídíme především jeho tepelnou roztažností, teplotou tavení a chemickými nečistotami vůči danému kovu. Materiály používané jako plniva do břechky nebo jako posypové materiály se mohou nebo nesmí používat stejné, proto jsou používány v široké kombinaci.

Žáruvzdorný materiál představují především křemičitany a kysličníky. Do kysličníků se řadí oxid hlinitý - Al_2O_3 a oxid zirkoničitý - ZrO_2 . Z křemičitanů využíváme zirkon, mulit, silimanit a převážně molochit.

Molochit není běžná surovina, jedná se v podstatě o mullit (56 %) ve sklovité obálce amorfního kysličníku křemičitého (44 %). Zirkon se díky jeho jemným zrnům – jemnozrný písek, využívá především jako primární posyp, jako je tomu u posypových materiálů v podobě prášku. Jako sekundární posyp se zirkon kvůli jemnozrnnosti moc nepoužívá, spíše se využívají hrubší syntetické materiály.

Nejčastěji používané žáruvzdorné materiály:

- **Zirkon** – v přírodě se běžně vyskytuje v podobě jemného písku (těžen nejvíce v Austrálii, Floridě, jižní Africe). Díky své netečnosti vůči kovu a jeho vysoké žáruvzdornosti se používá i jako plnivo i jako posypový materiál na primární obaly.

- **Tavený křemen** – vyroben z SiO_2 tavením a používá se především jako posypový materiál pro zesilovací a licí obaly, ale i jako plnivo. Má vynikající pevnost a rozpadavost, malou deformaci, tepelnou vodivost, žáruvzdornost, nízký koeficient tepelné roztažnosti a konzistentní chemické složení.
- **Tavený mulit** – řadí se do hlinitokřemičitanů, které jsou získány z bauxitu či kaolinu. K dosažení požadovaného chemického složení se rudy různě kombinují, mulit je vyroben tavením a následnou rekrytalizací ox. křemičitého. Je vhodný pro posyp na zesilovací obaly i pro obalové břčky pro ně určené. Mají vysokou žáruvzdornost, nízký koeficient tepelné roztažnosti a chemickou i tepelnou stabilitu.
- **Korund** – vyrábí se podobně jako tavený oxid křemičitý a má dvě modifikace – tavený a tabulární. Především je využit na posyp, má vysokou žáruvzdornost, mechanickou pevnost a vysoký koeficient tepelné roztažnosti.

2) Pojiva

Pojivem je myšlena vazná kapalina s žáruvzdorným materiálem. Tyto dva prvky spolu tvoří obalovou hmotu pro výrobu skořepin. Pro ideální skořepinu má mít pojivo následující vlastnosti:

- nesmí snižovat žáruvzdornost formy.
- musí předat formě po ztuhnutí dostatečnou pevnost po vysušení i vypálení.

Pojivem je především koloidní roztok oxidu křemičitého, dále organické sloučeniny hliníku, titanu, zirkonu a některé sloučeniny anorganické. Koloidní roztok je složen z polymerních etylsylikátů s obsahem křemíku kolem 40%. Spojení jednotlivých zrn plniva do obalové hmoty zajišťuje gelová vrstva, která je vytvořena amorfním SiO_2 a po vypálení přejde do krystalické formy. Křemičitanová pojiva jsou založena na lihové nebo na vodní bázi.

Vodní báze se nejvíce používá pro primární obaly a je vysoušena za pomoci vzduchu. Nevýhodou je, že schnou pomaleji než alkoholové báze a rychlost vypařování má vliv na kvalitu obalu, tudíž i na povrch odlitku.

Alkoholové báze mají výhodu, jak už bylo řečeno, v rychlém vysoušení (kdy další vrstva je možná nanášet po několika minutách), ale také ve vytvrzování. To je zajištěno amoniakem jakožto plynným prostředím. Báze se využívá při sekundárním obalu a tam, kde se obal aplikuje robotem.

Příprava keramické suspenze

Keramická suspenze je v podstatě smíchaný potřebný materiál (pojivo + plnivo) v požadovaném množství. Po smíchání se nechá celá suspenze v klidu, aby z ní unikl vmíchaný vzduch, a aby se zrnka pojiva dobře smočila. Viskozita suspenze se liší od velikosti a složitosti modelu. Pro drobnější a tvarově složitější modely se používá břčka řidší a naopak pro velké a málo složitější modely se používá břčka hustší. Od viskozity břčky se odvíjí i velikost zrn, kdy pro řidší se používají jemnější zrna a pro hustší zrna hrubší.

Je také důležité tuto suspenzi kontrolovat a testovat, abychom dosáhli opravdu kvalitního odlitku. Testování se řadí do dvou skupin, v první se sleduje chování a v druhé složení suspenze.

- a) chování suspenze: - viskozita
 - pění
 - krytí břčky

- b) Složení suspenze: - pH, bakterie
 - procentuální obsah ox. křemičitého, pevných látek v pojivu a pevných polymerních látek
 - měrná hmotnost
 - 24 – hodinový test gelace

3.2 Obalování – výroba skořepiny

Je to princip, kdy se sestavený voskový stromeček opakovaně namáčí do obalové hmoty – břechky a následně posype žáruvzdorným materiálem, který má vhodnou zrnitost podle jednotlivých vrstev. Tímto způsobem se zhotoví okolo celého stromečku keramická skořepina. Podle požadované tloušťky a pevnosti skořepiny se počet vrstev pohybuje od pěti do patnácti.

1) Příprava voskového modelu

Důležitým úkonem je očištění povrchu voskového modelu (odmaštění), jinak by docházelo k nedokonalému přilnutí první obalové vrstvy. Vyschlý obal by vlivem pnutí jinak popraskal a odlupoval, což má za následek nepříznivý defekt. Jedná se především o odstranění povrchových nečistot, jako je dělicí prostředek, který je použit při vstřikování vosku do matečné formy.

2) Namáčení do břechky

Sestavený a očištěný stromeček se ponoří do obalové hmoty – břechky, a je současně otáčen a nakláněn tak, aby se obalová hmota rovnoměrně rozmístila po celém povrchu stromečku. Důležité je dbát na to, aby se v koutech, rozích či drážkách netvořily vzduchové kapsy, nebo neulpěly vzduchové bubliny. Po vyjmutí z břechky se sestavou neustále manipuluje tak, aby se obalová hmota rovnoměrně rozmístila (po celém povrchu musí být přibližně stejná tloušťka materiálu) a přebytečný materiál odkapal.



Obr. 35 Ruční namáčení modelů do břechky [41]

3) Posypání žáruvzdorným materiálem

Po odkapání stromečku následuje posyp žáruvzdorným materiálem. Zásypový materiál se liší podle toho, jakou vrstvu zrovna tvoříme. Na první dvě vrstvy, které mají největší vliv na povrch odlitku, se používá ta nejjemnější zrnitost většinou o velikosti 0,1 – 0,25 mm, a na další vrstvy se používá větší zrnitost posypu a to 0,25 – 0,5 mm. Nejčastěji se sype pod proudem volně padajících částic (sprchový posyp), nebo fluidním posypem – ponoření do vzduchem načeřeného posypového materiálu.



Obr. 36 Posyp keramickým materiálem [41]

4) Sušení a chemické vytvrzování

Obal tuhne buď odpařením disperzního prostředí z kapalného pojiva, které způsobí stavovou změnu soli v gel, nebo k této změně dojde působením chemického činidla a odpaření disperzního prostředí následuje později.

Sušení probíhá v klimatizovaném prostoru o teplotě 20 – 24°C a při vlhkosti 50 – 70 %. V prostoru musí být zajištěno dostatečné proudění vzduchu, které podstatně zrychlí dobu sušení, a to vzduch o rychlosti alespoň 180 m/min. Při mírně ohřátém vzduchu na 25 – 27°C a rychlosti proudu 250 m/min, můžeme dobu sušení zkrátit až na 50 -55 s.

Chemické vytvrzování – rychloproces je způsob urychlování gelace. Nejčastěji se používá čpavek, kdy se skořepina krátce suší na vzduchu a poté se vystaví krátkodobému působení plynného čpavku. Čpavek se musí z obalu odstranit proudem vzduchu, dále následuje nové namočení, odkapání, posypání až dosáhneme potřebné tloušťky skořepiny. Poté se suší dle velikosti 3 – 8 hodin.



Obr. 37 Sušení keramiických forem [41]

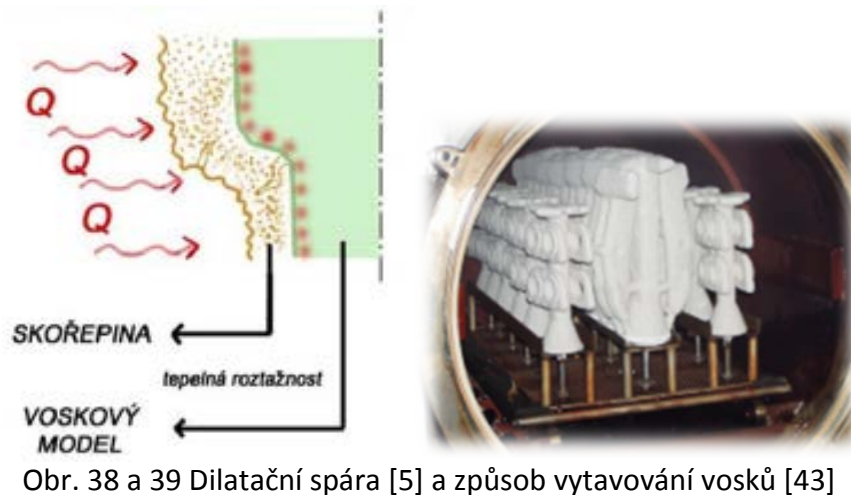
5) Vytavování voskové směsi

Vytavování je způsob jak dostat voskovou hmotu pryč z keramiické skořepiny. Rozhodující okamžik v tomto procesu je rozdíl mezi menší tepelnou roztažností keramiky a větší tepelnou roztažností vosků. Vosk musí být ohřát rychle, aby se zamezilo rozměrové dilataci (je nutná dilatační spára - na hranici mezi formou a voskovým modelem se vytvoří vrstva tekutého vosku), která způsobuje praskání formy. Kdybychom totiž formu ohřívali pomalu (bod tavení 60 – 90°C), vosk by se tepelně roztahoval a došlo by k popraskání. Je to také poslední část výroby k odhalení chyby, protože vosk sám detekuje chyby, díky jeho vsakování, obzvláště pokud máme tmavý vosk, který prosákne skrz formu a zobrazí vadu na povrchu formy.

Vytavování lze provádět hned několika způsoby:

- V autoklávu – jeho výhodou je menších ztrát na modelovém vosku a menší množství popraskaných skořepin. Délka tavby 5 -25 minut.
- V peci za vysoké teploty okolo 900 – 1000°C, kdy se vytavování vosku spojí s vypálením skořepiny. Doba trvání vytavování je 15 – 25 minut.
- Dielektrickým ohřevem – děj, kdy se povrch skořepiny zvlhčí vodou a umístí se do pole s vysokofrekvenční oscilací. Skořepina se rychle ohřeje a vosk odpařovaný v těsné blízkosti u skořepiny vytvoří dilatační zónu, která zabrání popraskání skořepiny.
- Horkým vzduchem - kdy se proud horkého vzduchu zavádí do středu vtoku. Vtok se protaví dříve, než se stihne ohřát celý model a odtavování se děje uvnitř.
- Za nízké teploty – provádí se v roztavené a přehřáté hmotě stejného složení jako hmota modelu.

Nejpoužívanější metodou je vytavování v autoklávu, kde se přehřátou parou zajistí tepelný šok. Teplota páry je závislá na jejím tlaku, a proto se používají zařízení s pracovním tlakem 0,3 – 0,6 MPa a teplotě páry od 135 do 175°C. Umístění skořepin se volí tak, aby mohl vosk volně odtéct do sběrné nádoby. Následně je regenerován.



Obr. 38 a 39 Dilatační spára [5] a způsob vytavování vosků [43]



Obr. 40 Skořepina před a po vytavení vosku [42]

6) Žíhání skořepiny

Vypalování keramické formy je důležité pro to, aby forma snesla při odlévání kovu jeho vysokou teplotu a nepopraskala. Pokud byla dobře zvolena kombinace posypových hmot a keramické břčky, můžeme používat široký výběr slitin pro odlévání. Žíhání má další důležité důvody proč ho dělat. Je to především odstranění zbytku voskového materiálu a těkavých látek ve skořepině, zhuštění struktury keramiky – tedy dosažení její potřebné pevnosti a dále slouží jako předehřátí formy před litím na stanovenou teplotu.

Těkavých látek – alkoholu a vody, se zbavujeme každé jinak. Při teplotě nižší jak 100°C lze odstranit alkohol, ale vodu vázanou v gelové struktuře křemičitého pojiva touto teplotou nelze zcela odstranit. Je třeba tedy formu zahřát na více jak 1000°C.

Zhuštění struktury keramiky se děje při převodu z amorfni formy vázané vrstvy SiO_2 na formu krystalickou. Žíhací teplota pro SiO_2 je okolo 900 – 1000°C a pro molochit a korund je to okolo 1200 – 1400°C.

Při vypalování zbytkového vosku musíme zajistit dostatečný přívod kyslíku. Kvalitní vosky nesmí obsahovat více jak 1% zbytků popela. Proto se používají spíše odporové pece, které mají účinnou ventilaci a odstraní zuhelnatělý vosk.

Při prvním ohřevu o teplotě 300 – 400°C se do pece vkládají studené formy, které překonají teplotní náraz, a postupně se prohřeje celá skořepina, aniž by se odlupovaly vrstvy nebo začala praskat. Teplota se dále zvyšuje na cca 575°C a začínají objemové změny, proto se ohřívá po dobu 30 minut. Další ohřev už je na požadovanou teplotu po dobu 60 – 80 minut. Při teplotě okolo 1500°C, která je pro usměrněné tuhnutí, je důležité, aby byl kov po určitou dobu tekutý. U speciální slitiny je potřeba teploty vyšší jak 1500°C, ale pokud použijeme keramiku na bázi křemičitanů, hrozí tavení křemičitanu. U slitin s nižším bodem tavení se používá teplota vypalování asi 850°C. Po vizuální kontrole, zda nejsou praskliny nebo jiné defekty, je forma připravena k odlévání.



Obr. 41 Žihání skořepin [43]

4 ODLÉVÁNÍ A DOKONČUJÍCÍ OPERACE [1],[2],[4],[5],[7],[9]

4.1 Odlévání

Odlévání i tavení je jeden z nejdůležitějších procesů v této technologii pro výrobu kvalitních a přesných odlitků. Odlévat můžeme širokou škálu slitin. Dnes používají většiny sléváren indukční pece jádrové nebo bezjádrové a vakuové pece. Do formy se odlévá vždy po jejím vypálení, tím se zmenší teplotní šok, omezí se vnitřní pnutí a sníží se nebezpečí praskání.

Nejčastěji se využívá odlévání na vzduchu (otevřené lití) nebo ve vakuu (vakuové lití), při teplotách forem od 700 do 800°C nebo na teplotě okolí, zde však hrozí nebezpečí praskání formy. Pro nejvyšší kvalitu odlitku se provádí ve vakuu.



Obr. 42 Klasické odlévání [43]

A) Klasické lití

Také můžeme nazvat gravitační lití, kdy je skořepina umístěna v licím poli, do něhož se nalévá roztavený kov. Ten využívá vlastní síly pro zatečení do formy.

B) Lití ve vakuu

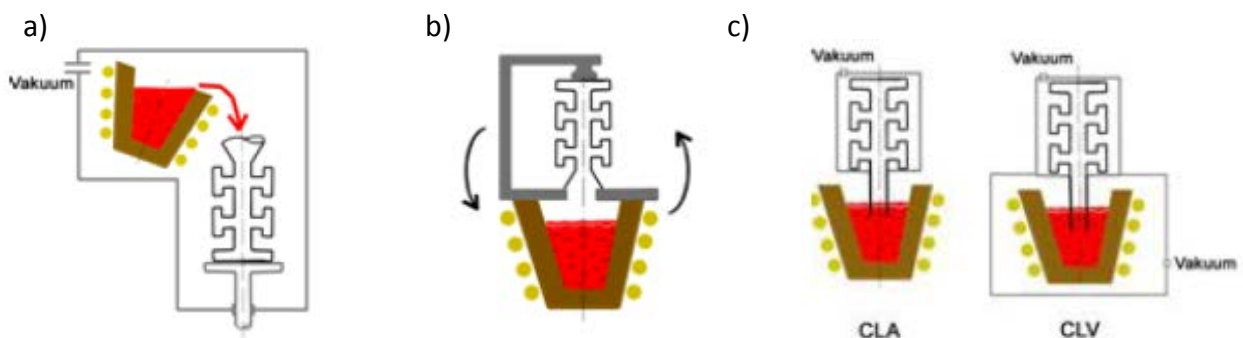
Forma je umístěna do vakuové komory, kde se vysaje všechen vzduch a postupným uvolňováním podtlaku se odlévá. Výrobky mají vysokou kvalitu, především jsou bez vzduchových bublin. Tato metoda je bohužel nákladná a nemá vysokou produktivitu.

C) Sklopné lití

Je to metoda, kdy se k tavící peci připojí forma. Dojde k naklonění pece a jejímu plnění kovem – odlévání.

D) Vakuové nasávání

Tato metoda se dělí na další dvě. Je to CLA – forma je umístěna ve vakuu, CLV – forma i kelímek s roztaveným kovem je umístěn ve vakuu. Nad kelímek s kovem se umístí skořepinová forma a za podtlaku se do skořepiny nasaje kov. Je možno touto metodou vytvářet kvalitní odlitky a umožňuje nám také odlévat vysoce reaktivní kovy jako je hořčík.



Obr. 43 a) Vakuové lití, b) Sklopné lití, c) Vakuové nasávání [9]

4.2 Dokončující operace

Jsou to nejpracnější operace v technologii vytavitelného modelu. Mají své určité pořadí a to je:

- Odstranění převážné části keramické skořepiny – nejčastěji mechanicky.
- Odstranění vtokové soustavy.
- Zbavení modelů zbylé keramiky buď mechanicky, nebo chemicky.
- Odstranění vtoků z odlitků.
- Tryskání a dokončování.

U některých odlitků může dále následovat tepelné zpracování, dodatkové obrábění a příprava na expedici.

A) Odstranění převážné části keramiky

Zbavování modelu keramické vrstvy se obvykle provádí mechanicky po zchladnutí kovu, jelikož je tato vrstva po odlití vysoce pevná a odstranění je komplikované. Nejčastěji se pro účinnost využívá vibrační oklepávání. Bohužel je tato metoda vysoce hlučná a má velkou prašnost. Vibrační stoj či vibrační kladivo je tedy umístěn do zvukotěsné a prachotěsné kabiny. Novým trendem odstraňování keramiky je vysokotlaký vodní paprsek.

B) Odstranění vtokové soustavy

V této části operace se odstraňují nejen modely od vtokové soustavy, ale také vtoky. Nejčastěji se používají kotoučové a třecí pily. Pro hliníkové odlitky je vhodnější použití pásové pily.

C) Odstranění zbylé keramiky

Jedná se o keramiku, která zůstala ve špatně přístupných místech, jako jsou dutiny a rohy. Máme dva způsoby, jak lze tuto keramiku odstranit a to chemicky a abrazivně.

1) Chemické metody

Neočištěné modely se ponořují do lázně, kde dochází k odstranění zbylé keramiky. Zde se metoda rozšiřuje na dvě podle použité žíraviny. Metoda se používá na odstranění keramických jader za pomoci louhování v autoklávu pro odstranění i velice tvarově složitých jader. Louhuje se koncentrovanou vodní žíravinou nebo kyselinou fluorovodíkovou.

- **Lázeň s rozpouštěnou solí** - jedná se o lázeň s rozpouštěnou solí hydroxidu sodného a s nebo bez vyrovnávacích aditiv. Teplota lázně se pohybuje od 475 po 600 °C a odlitek je v ní ponořen po dobu 20 minut. Sůl důkladně odstraní zbytky skořepiny a po vytáhnutí se odlitky oplachují od soli. Následuje ponoření do kyseliny, kde dojde k odstranění okují.
- **Horká vodní žíravá lázeň** - jde o alkalické koncentráty – hydroxid draselný, kdy má lázeň teplotu okolo 80°C a odlitky jsou zde ponechány po několik hodin. Po odstranění zbytkové skořepiny jsou odlitky opláchnuty horkou vodou. Následuje sušení.

2) Abrazivní metody

Metodu můžeme rozdělit na dvě odlišné metody, jsou to tlakové tryskání a tryskání bez použití vzduchu.

- **Tlakové tryskání** - nosné médium je zde vzduch nebo voda, která dopravuje vysokou rychlostí abrazivní materiál na povrch odlitku. Tryskání s vodním médiem se dělí na: tryskání v uzavřené jednotce a otevřené tryskání vodním paprskem.
- **Tryskání bez použití vzduchu** - jedná se o metodu, při které nosným médiem není stlačený vzduch, nýbrž ocelové broky či keramická drť, jež je na povrch materiálu vrhána pomocí lopatkového kola.

D) Odstranění vtoků – dokončující operace

Mezi dokončující operace patří odstraňování vtoků z odlitků, broušení, čištění povrchových vad a leštění. Za použití brousícího zařízení jako jsou brusky horizontální a vertikální, s výkyvným ramenem, zapichovací brusky a další ruční brusky. Místo brusných kotoučů jsou zde brusné pásy.

E) Kontrola odlitků

Nejdůležitější prvky, které se zde kontrolují je tvar a rozměr odlitku. Provádí se jak destruktivní jako je chemická analýza a mechanické zkoušky, tak nedestruktivní. Dále zkoušky netěsnosti a maximálního zatížení.

- **Metody pro rozměrovou kontrolu** - rozměrová přesnost je tím nejdůležitějším požadavkem u odlitků vyrobených technologií přesného lití. Nejběžněji používáme ke kontrole mikrometry jak ruční, tak automatické, dále souřadnicových systémů a tří-rozměrný automatický měřicí systém.
- **Metody pro zjišťování kvality povrchu** - existuje zde velký počet metod jak v odlitku zjistit trhlinky a jiné povrchové vady. Řadí se sem povrchová vizuální kontrola, chemické leptání, fluorescenční kapilární metoda, zkouška vířivých proudů a magnetická zkouška pro zjišťování vad přímo pod povrchem. Pro tuto zkoušku je nutné mít povrch odlitku očištěn a relativně hladký.
- **Metody nedestruktivní** - je to především pro zjištění vnitřní vady. Dělí se na optické, akustické, elektromagnetické, tepelné, radiografické a vzájemně různě propojené. Nejčastěji se používají:
 - Vizuální
 - Penetrační
 - Rentgenové
 - Ultrazvukové
 - Magnetické
 - Vířivých proudů

Dominantní metody pro technologii Near-net-shape je především kontrola rentgenová, penetrační a vizuální.

5 UPLATNĚNÍ TECHNOLOGIE A TRENDY VE VÝROBĚ

5.1 Využití v průmyslu [1],[5]

Jak už bylo řečeno tato technologie má uplatnění velice rozsáhlé, především je to však v letectví, energetice, automobilovém průmyslu, kosmonautice, počítačích, zbrojním průmyslu, potravinářském průmyslu, pumpách, ve sportovním odvětví, lékařství, chemickém průmyslu, šperkařství, uměleckých předmětech a mnoho jiných.



Obr. 44 Příklady užití technologie v různých odvětvích [44],[47],[48],[46],[45]

5.2 Výroba prototypů pomocí 3D technologie [14],[18],[25],[26]

Obecně je technologie „rapid prototyping“ (neboli rychlá výroba) v dnešní době velice rozšířená a našla uplatnění i v technologii přesného lití a celkově ve slévárenství. Především se z ní tvoří modely pro prototypové odlitky. V naší technologii se jedná o tvorbu voskového modelu a výrobu keramické skořepiny. Její největší výhodou je velice rychlá výroba, ovšem není použitelná pro velkosériovou výrobu odlitků.

Technologie 3D tisku spočívá v tom, že se na základovou desku nanáší pomocí trysky roztavený, v našem případě vosk (jinak plast, kovový prášek a dokonce i beton), a po jednotlivých vrstvách postupně vzniká model. Je to tedy obrácená metoda, kdy je materiál přidáván, oproti obrábění, kde je odebírán. Podrobněji jak celý model vzniká a kolik je různých typů této technologie, se nebudeme zabývat.

Jak bylo řečeno cílem je vytvořit co nejrychleji prototypový odlitek. V probírané technologii je tvorba soustředěna na netrvalé modely, formy, jádra a skořepiny.

- **Model** – materiály na výrobu modelu jsou hned dva. Prvním je vosková směs v podobě dlouhých tuhých „drátů“ namotaných na cívku. Druhý materiál je klasický ABS plast také v podobě drátů, ovšem v tomto případě se nejedná o vytavitelný model, ale o spalitelný. Nevýhodou je, že se model během procesu zničí. Stejným způsobem může být vytvořeno i jádro.
- **Forma** – princip výroby je opět stejný. Nanášením se vytvoří požadovaný tvar formy, do které se, jako do klasické kovové formy, odlije roztavený vosk. Také je možné

vytvořit formu metodou tzv. Soft Toolingu, kdy se pomocí některé z metod RP vytvoří přesný model – master model, a na tento vytvořený model se nalije hmota na uretanové bázi. Forma je určena pro malé série (1 – 100 ks), a užívá se především pro ušetření času a nákladů u výroby prototypového odlitku.

- **Skořepina** – jedná se o přímou výrobu samonosné skořepiny, do které jsme schopni hned po jejím ztuhnutí odlévat. Jedná se buď o spékání keramického prášku pomocí laseru (metoda DLSC), nebo je to proces, kdy roznášecí válec rozprostírá po podložce keramický prášek a tisková hlava kopíruje obrys a nanáší pojivo, jež spojuje jednotlivá zrnka (metoda DSPC). Minimální tloušťka vrstvy je 50 μm . Velikou výhodou je ušetřený čas oproti klasické výrobě a dobrá rozměrová přesnost, oproti tomu nevýhodou je drsnost povrchu, která je vyšší jak u klasické výroby. Značnou nevýhodou je také to, že nejsme schopni zjistit vnitřní rozměry skořepiny.



Obr. 45 Ukázka výrobků vytvořených technologií „rapid prototyping“ [50],[49]

ZÁVĚR

Hlavním úkolem bylo sepsat literární rešerši o technologii vytavitelného modelu v současnosti. V této práci jsou popsány jednotlivé postupy při výrobě od zhotovení formy, výrobě voskového modelu, zhotovení skořepiny až po vytavení, vyžihání a odlévání. Největší kapitola se zabývá především vosky a to jaké druhy se používají a jaké jsou metody zkoušení vosků, aby měli požadované vlastnosti pro kvalitní model. Část je zde věnována i výrobě jader, jak voskových, tak keramických.

Dále je zde uvedeno v jakých různých odvětví se tato progresivní technologie využívá a jaké jsou její nejaktuálnější trendy ve výrobě.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BEELEY, Peter R. a Robert F. SMART, 1995. *Investment casting*. London: The institute of materials. ISBN 0 901716 66 9.
2. HERMAN, Aleš, *Lití na vytavitelný model* [online]. In: . s. 30 [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/419638-Ing-ales-herman-ph-d.html>
3. HORÁČEK, Milan, 2009. *Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu*. Brno.
4. DOŠKÁŘ, Josef, Jan GABRIEL, Miroslav HOUŠŤ a Miroslav PAVELKA, 1976. *Výroba přesných odlitků*. Praha: SNTL.
5. SOUKUPOVÁ, Lucie, 2011. *Technologie vytavitelného modelu v současnosti*. Brno. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
6. TALANDA, Ivan, 2012. *Optimalizace technologie výroby odlitků ze slitin Al metodou vytavitelného modelu*. Brno. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
7. ŽUJA, Jaroslav, 2013. *Technologie vytavitelného modelu v současnosti*. Brno. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
8. ŽUJA, Jaroslav, 2015. *Optimalizace technologie výroby voskových modelů ve firmě Fimes*. Brno. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
9. MATOUŠEK, Roman, 2014. *Technologie vytavitelného modelu v současnosti*. Brno. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
10. PROCHÁZKA, Zdeněk, 2009. *Technologie vytavitelného modelu v současnosti - problematika voskových modelů*. Brno. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
11. ŠTIPL, Pavel, 2012. *Současné trendy ve výrobě keramických skořepinových forem*. Brno. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
12. KOBĚRSKÝ, František, 2010. *Optimalizace výroby voskových modelů - voskové směsi a jejich zkoušení*. Brno. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
13. HALAŠKA, Jan, 2016. *Trendy ve výrobě voskových modelů u technologie vytavitelného modelu*. Brno. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

-
14. HORÁČEK, Milan, Radim ČAGÁNEK a Vojtěch VAŠEK, 2016. Možnosti uplatnění moderních metod při výrobě prototypových odlitků. *Slévárství*. **LXIV**(7-8), 7.
 15. TOMEK, Ladislav, Boris LÁNÍK, Jiří SEDLÁČEK a Václav VINTER, 2012. Vodou vyplavitelná jádra pro hliníkové odlitky lité na vytavitelný model. *Slévárství*. **LX**(9-10), 7.
 16. TALANDA, Ivan, Milan HORÁČEK a Jan JEDOVNICKÝ, 2012. Moderní voskové směsi a výběr jejich nejvhodnějších kombinací pro slévárnu Fimes, a.s. *Slévárství*. **LX**(9-10), 5.
 17. KOSOUR, Vojtěch, Milan HORÁČEK a Jiří HORENSKÝ, 2012. Kvalitní voskový model - základní předpoklad kvalitního odlitku zhotoveného metodou vytavitelného modelu. *Slévárství*. **LX**(9-10), 3.
 18. MACKŮ, Martin a Milan HORÁČEK, 2012. Možnosti metod RP v kombinaci s technologií vytavitelného modelu. *Slévárství*. **LX**(9-10), 6.
 19. BOND, David, David MORSON, Phil HANCOCK a Milan HORÁČEK, 2012. Pokroky při testování vosků ovlivňující jejich další rozvoj. *Slévárství*. **LX**(9-10), 5.
 20. HORÁČEK, Milan, 2001. Přehled světové výroby odlitků metodou vytavitelného modelu. *Slévárství*. **XLIX**(10), 7.
 21. Para - Tech Medical Wax, 2014. *Westech* [online]. California [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: <http://www.westechwax.com/para-tech-medical-wax/>
 22. Sheet wax, 2014. *Westech* [online]. California [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: <http://www.westechwax.com/sheet-wax/>
 23. Machinable wax, 2014. *Westech* [online]. California [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: <http://www.westechwax.com/machinable-wax/>
 24. All About Tooling, Patterns and Cores, 2017. *Niagara investment casting* [online]. Ontario [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: <http://niagarainvestmentcastings.com/design-and-engineering/all-about-tooling-patterns-and-cores/>
 25. 3D Printing for Bridge Tooling, 2017. *Stratasys* [online]. [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/solutions/additive-manufacturing/tooling/investment-casting/>
 26. 3D PRINTING SAVES UP TO 75 % IN SAND CASTING COSTS, *Voxeljet* [online]. [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: <http://www.voxeljet.com/industries/foundries/3d-printing-saves-up-to-75-in-sand-casting-costs/>
 27. Ceramic and Plaster Mold, *American Foundry Society* [online]. Schaumburg [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: <http://www.afsinc.org/content.cfm?ItemNumber=7805>
 28. Investment Casting FAQs, *American Foundry Society* [online]. Schaumburg [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: <http://www.afsinc.org/content.cfm?ItemNumber=6904>
-

-
29. *Westech* [online], 2014. California [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: <http://www.westechwax.com/investment-casting-wax/>
 30. Investment Casting, 2015. In: *Cleason Sales Company, INC.* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: http://www.gleasonsales.com/investment_casting.php
 31. Perseus with the haed of Medusa, 2017. In: *Pinterest* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: [https://cz.pinterest.com/search/pins/?q=perseus%20with%20the%20head%20of%20medusa&rs=typed&term_meta\[\]=perseus%20with%20the%20head%20of%20medusa%7Ctyped](https://cz.pinterest.com/search/pins/?q=perseus%20with%20the%20head%20of%20medusa&rs=typed&term_meta[]=perseus%20with%20the%20head%20of%20medusa%7Ctyped)
 32. The investment casting process, 2017. In: *Pennsylvania Precision Cast Parts, INC.* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://ppcpinc.com/investment-castings/>
 33. New Mold Star 15 – Easy To Use, High Tear Strength Platinum Silicone Offers Advantages, 2010. In: *TFB Plastics* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <https://www.tfbplastics.com/Candlemaking#>
 34. 3DM -CAST resin, 2016. In: *3DM* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <https://www.3dm-shop.com/blank-rwrlr/3dm-wax>
 35. Direct print ceramic cores, In: *Eagle Engineered Solutions* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://eagle-esi.com/products/direct-ceramic-cores/>
 36. 3D tisk z písku, forma, jaderníky, chlazení, 2010. In: *3D Tiskárna* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.3dtiskarna.cz/products/a3dtisk-z-pisku/>
 37. Superalloy casting for gas turbine, In: *The Harbin Xinrun Industrial Co., Ltd.* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.hxric.com/english/products.aspx>
 38. Differential Scanning Calorimetry, 2017. In: *The UL Thermoplastics Testing Center* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.ulttc.com/en/solutions/test-methods/thermal-analysis/differential-scanning-calorimetry-dsc.html>
 39. Fourier Transform-Infrared Spectroscopy, 2015. In: *Analytical Instruments* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://analyticalprofessional.blogspot.cz/p/oil.html>
 40. Rheology of Thermosets Part 2: Rheometers, 2017. In: *Polymer Innovation Blog* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <https://polymerinnovationblog.com/rheology-thermosets-part-2-rheometers/>
 41. TPM Metalcraft Minute: April 16, 2015, Volume 6, 2015. In: *Texas Precision Metalcraft* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://txpm.com/tpm-blog-newsletter/>

-
42. TPM Metalcraft Minute: July 29, 2015, Volume, 2015. In: *Texas Precision Metalcraft* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://txpm.com/tpm-blog-newsletter/>
 43. Slévárna přesného lití: Postupy výroby, In: *Moravia tech* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.moraviatech.cz/24820-slevarna-presneho-liti>
 44. Medical Implants Parts: Investment casting, In: *Amazon technocast* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.amazontechnocast.com/medical-implants.html>
 45. General Engineering: Investment casting, In: *Amazon technocast* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.amazontechnocast.com/general-engineering.html>
 46. Food and Bevarages Machinery Parts: Investment casting, In: *Amazon technocast* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.amazontechnocast.com/food-and-bevarages.html>
 47. Pump Parts: Investment casting, In: *Amazon technocast* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.amazontechnocast.com/pumps.html>
 48. Casting jewelry, 2016. In: *Kat Kramer* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.katkramer.com/blog/2014/11/27/casting-jewelrymaking-the-tree-part-three>
 49. High quality, Wax Jet 3D printer for investment casting 3D printer, In: *3D Printer* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.3dprinter1.net/en/64-high-quality-wax-jet-3d-printer-for-investment-casting-3d-printer.html>
 50. Investment Casting: 3D Printing for Bridge Tooling, In: *Stratasys* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/solutions/additive-manufacturing/tooling/investment-casting>
 51. What is Investment casting, In: *Reliance Foundry* [online]. [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.reliance-foundry.com/castings/investment-casting#gref>
 52. FIELDER, Harvey, 2010. *The Mechanical properties of Investment Casting Waxes*. Crayford. REMET UK Ltd.

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Odlitky vyrobené technologií vytavitelného modelu [30]
Obr. 2 Bronzová socha Persea s hlavou Medúzy (Cellini – 1540) [31]
Obr. 3 Ukázka odlitků vyrobených metodou vytavitelného modelu [47],[34]
Obr. 4 Jednotlivé kroky při výrobě odlitku [32]
Obr. 5 Voskové modely [29]
Obr. 6 Forma zhotovená obráběním [29]
Obr. 7 Forma z nízkotavitelné slitiny [5]
Obr. 8 Sádrová forma [5]
Obr. 9 Forma ze silikonového kaučuku a model [33]
Obr. 10 Forma vyrobená pomocí galvanoplastiky [5]
Obr. 11 Výroba forem metalizací [5]
Obr. 12 Schéma vstřikovacího nástroje [5]
Obr. 13 Voskové čočky [29]
Obr. 14 Pryskyřice pro přesné lití využita pro klenoty [34]
Obr. 15 Tvrdý vosk [23]
Obr. 16 Plátový vosk [22]
Obr. 17 Keramické jádro vytvořené 3D tiskem [35]
Obr. 18 Keramické jádro pro lopatku [37]
Obr. 19 Pískové jádro pro konformní chlazení vytvořené 3D tiskem [36]
Obr. 20 Model z rozpustného a modelového vosku [24]
Obr. 21 Keramické jádro bez a s modelovým voskem a hotový odlitek [24]
Obr. 22 Měření bodu skápnutí [6]
Obr. 23 Měření bodu tuhnutí [6]
Obr. 24 Forma pro zkoušku zabíhavosti [6]
Obr. 25 Zkouška ohybem [52]
Obr. 26 Princip zkoušky DSC [38]
Obr. 27 Princip zkoušky FTIR [39]
Obr. 28 Princip oscilační zkoušky [40]
Obr. 29 Sestava jednoho modelu [51]
Obr. 30 Modelový stromeček
Obr. 31 Stromečkové sestavy [7]
Obr. 32 Regenerace voskové směsi [5]
Obr. 33 Schéma regenerace voskové hmoty [5]
Obr. 34 Schéma rekonstituce voskové hmoty [5]
Obr. 35 Ruční namáčení modelů do břechky [41]
Obr. 36 Posyp keramickým materiálem [41]
Obr. 37 Sušení keramických forem [41]
Obr. 38 a 39 Dilatační spára [5] a způsob vytavování vosků [43]
Obr. 40 Skořepina před a po vytavení vosku [42]
Obr. 41 Žihání skořepin [43]
Obr. 42 Klasické odlévání [43]
Obr. 43 a) Vakuové lití, b) Sklopné lití, c) Vakuové nasávání [9]
Obr. 44 Příklady užití technologie v různých odvětvích [44],[47],[48],[46],[45]
Obr. 45 Ukázka výrobků vytvořených technologií „rapid prototyping“ [50],[49]

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Objemy prodeje odlitků ve světě [20]

Graf 2 Závislost tvrdosti směsi na teplotě [6]

Graf 3 Vliv plniv ve voskových směsích na roztažnost [6]

